

IDENTIFICACIÓN DE ÁREA QUEMADA POR DERRAME DE CRUDO EN UN SECTOR DEL MUNICIPIO DE ARAUQUITA - OLEODUCTO CAÑO LIMÓN-COVEÑAS, POR MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE, PARA DETERMINAR LA AFECTACIÓN DE LAS COBERTURAS PRESENTES EN EL MES DE SEPTIEMBRE DE 1997.



**IDENTIFICACIÓN DE ÁREA QUEMADA POR DERRAME DE CRUDO EN UN SECTOR
DEL MUNICIPIO DE ARAUQUITA - OLEODUCTO CAÑO LIMÓN-COVENAS, POR
MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE, PARA DETERMINAR LA AFECTACIÓN DE LAS
COBERTURAS PRESENTES EN EL AÑO 1997.**

LINA VANESSA LATORRE CONDE

Ingeniera Topográfica

**Francisco Luis Hernández
Director de Trabajo de Grado**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
MAYO DE 2015**

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Santiago de Cali, Mayo 14 de 2015

DEDICATORIA

Inicialmente deseo dedicarle este trabajo de manera especial a Dios por darme la posibilidad de llevar a cabo uno de los proyectos más importantes de mi vida, por brindarme tranquilidad, alegría y la fortaleza para asumir cada momento de esta etapa próxima a culminar y hacer de mi un ser con mayor capacidad moral y disciplinado.

A mis padres, Gerson Latorre y Mónica Conde, les agradezco profundamente que hayan creído en mis capacidades y me hayan brindado una formación moral la cual es el eje fundamental en mi desarrollo espiritual, personal, académico y profesional en cada uno de mis días; por la dicha que me ha dado Dios al ponerme junto a ellos y la fortuna de que me acompañen en mi proceso de vida, pero más que nada por su amor incondicional.

A mis familiares, en especial a mis hermanas Victoria y Tatiana, por haberme apoyado en todo momento, por su acompañamiento, consejos, por la motivación constante para alcanzar mis objetivos y su infinito amor.

“...se requiere de muchos estudios para ser profesional, pero se requiere de toda una vida para aprender a ser persona” **Dávila J**

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente a la Universidad del Valle, por bríndame los conocimientos en la ciencia, cultura, arte, humanidades y técnicas para asumir mi responsabilidad profesional y ser una persona de bien para la sociedad por medio de la utilización de los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera.

A los docentes del programa de Ingeniería Topografía por permitirme aprender de sus conocimientos, desarrollar habilidades, ganar experiencia y disciplina.

A Francisco Hernández por la orientación, acompañamiento y compromiso, desde el momento de la formulación hasta la finalización satisfactoria del proyecto de grado.

A mis amigos, personas valiosas, que tuve la fortuna de conocer en transcurso de la carrera, para apoyarnos mutuamente en nuestra formación profesional, les doy gracias por permitirme luchar juntos, por su afecto y apoyo.

Y finalmente las entidades (IGAC, USGS, ANLA, BMC, Ecopetrol) que proporcionaron información histórica y herramientas espaciales para el desarrollo metodológico y obtención de resultados de la propuesta de trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACION	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 GENERAL	15
3.2 ESPECIFICOS	15
4. MARCO DE REFERENCIA	16
4.1 MARCO CONCEPTUAL.....	16
4.1.1 Teledetección espacial	16
4.1.2 Componentes de un sistema de percepción remota	16
4.1.3 Espectro electromagnético	17
4.1.4 Interacción de la energía con la superficie terrestre.....	18
4.1.5 Características espectrales de la vegetación	19
4.1.6 Comportamiento espectral de la vegetación	20
4.1.7 Reflectancia de cubiertas vegetales	21
4.1.8 Imágenes Landsat	22
4.1.9 Índices de vegetación	22
4.1.10 Clasificación digital	22
4.1.11 Incendios forestales.....	22
4.1.12 Derrames de crudo.....	23
4.1.13 Contaminación ambiental	23
4.2 MARCO TEORICO	23
4.2.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	23
4.2.2 Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	24
4.2.3 Índice de vegetación global (GEMI)	24
4.2.4 Cociente normalizado de quema (NBR)	25
4.2.5 Índice de área quemada (BAI)	25
4.2.6 Clasificación no supervisada ISODATA	26
4.2.7 Clasificación supervisada	26

4.2.8	Matriz de confusión	26
4.2.9	Coeficiente estadístico Kappa	27
4.3	MARCO REFERENCIAL	28
5.	MARCO METODOLÓGICO	30
5.1	ZONA DE ESTUDIO	32
5.2	MATERIALES	33
5.2.1	Imágenes Landsat	33
5.2.2	Información espacial	34
5.2.3	Software	34
5.3	MÉTODOS	34
5.3.1	Imágenes Landsat	35
5.3.2	Procesamiento	38
5.3.3	Clasificación	40
5.3.4	Validación	41
6.	RESULTADOS	41
6.1	Pre-procesamiento	41
6.1.1	Radiancia	41
6.1.2	Reflectancia	42
6.2	Procesamiento	43
6.2.1	Índices de vegetación	43
6.2.2	Índices de quema	53
6.2.3	Determinación de la afectación de las coberturas	54
6.2.4	Validación	59
7.	DISCUSIÓN	65
8.	CONCLUSIONES	67
9.	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA	70
	ANEXOS	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes de un sistema de percepción remota.	17
Figura 2. Diagrama del espectro electromagnético	18
Figura 3. Interacciones de la energía con la hoja.....	18
Figura 4. Factores que modifican la reflectividad.	20
Figura 5. Firma espectral de la hoja.....	21
Figura 6. Firmas espectrales de la vegetación.....	21
Figura 7. Cambios que experimenta la firma espectral de la vegetación.....	30
Figura 8. Proceso metodológico para la identificación de área quemada.....	31
Figura 9. Localización área de estudio.....	33
Figura 10. Escenas seleccionadas zona de estudio.....	36
Figura 11: Banda espectral de las imágenes de radiancia	42
Figura 12: Imágenes en valores de reflectancia.....	42
Figura 13. NDVI en las imágenes pre-incendio y post-incendio	44
Figura 14. Histogramas de las imágenes NDVI pre y post-incendio.....	45
Figura 15. SAVI en las imágenes pre-incendio y post-incendio.....	46
Figura 16. Histogramas de las imágenes SAVI pre y post-incendio	46
Figura 17: GEMI en las imágenes pre-incendio y post-incendio.....	48
Figura 18. Histogramas de las imágenes GEMI pre-incendio y post-incendio.....	48
Figura 19: Diferencias de los índices de vegetación para la ventana de interés.	50
Figura 20: Histogramas pre y post-incendio de índices de vegetación.....	51
Figura 21. Identificación de áreas asociadas a los índices BAI y NBR.....	54
Figura 22: Clases del mapa identificación del área afectada.	55
Figura 23: Mapa de identificación de áreas afectadas por quema de crudo a partir de clasificación supervisada de máxima verosimilitud.	56
Figura 24. Mapa de identificación de áreas afectadas por quema de crudo a partir de clasificación no supervisada.	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Tipos de exactitud para la validación de clasificación de imágenes.	27
Tabla 2. Categoría de concordancias de validación para el coeficiente Kappa	28
Tabla 3. Afectación por incendios sobre las unidades del paisaje, región Orinoquia.....	34
Tabla 4. Información de imágenes.....	35
Tabla 5. Características de Landsat 5.....	35
Tabla 6: Constante solar o irradiancia solar exoatmosférica	38
Tabla 7. Área de las clases discriminadas con el índice NBR.....	53
Tabla 8. Resultado de la aplicación del índice BAI.....	54
Tabla 9: Variación del área de coberturas clasificación no supervisada.....	58
Tabla 10: Variación del área de coberturas clasificación supervisada.....	58
Tabla 11: Área total de afectación.....	59
Tabla 12: Matriz de confusión de la clasificación no supervisada	60
Tabla 13: Error de omisión y comisión para las coberturas afectadas clasificadas	61
Tabla 14: Exactitud de producto y usuario según la matriz de confusión de clasificación no supervisada.	61
Tabla 15. Matriz de confusión de la clasificación supervisada.	62
Tabla 16. Exactitud de producto y usuario según la matriz de confusión de clasificación supervisada.	63
Tabla 17. Error de omisión y comisión para la clasificación supervisada de coberturas...	64

RESUMEN

Los incendios producidos por quema de crudo son eventos catastróficos debido a los grandes volúmenes que maneja la industria petrolera y a su acelerado esparcimiento, que a su paso deterioran y causan un desequilibrio ecosistémico fuerte, sin dejar de lado los riesgos que pueden representar para las poblaciones aledañas del accidente y que se abastecen de las condiciones ambientales del área. Lo que supone, después de la ocurrencia del incendio forestal, la necesidad de identificar las variables ambientales implicadas y estimar la distribución y extensión del área quemada, a partir de la evaluación de daños ambientales para la descripción del impacto territorial.

Se estudió una serie multitemporal de escenas del mes de septiembre del año 1996 pre incendio y 1997 post incendio, ocurrido aproximadamente en el tramo 47km del oleoducto localizado en el municipio de Arauquita, Departamento de Arauca, Colombia y delimitado por el área del incendio. El producto cartográfico generado constituye una información útil para la planificación de actividades dirigidas a la recuperación de los efectos causados por el incendio que tienen principal impacto en las superficies vegetales.

El desarrollo del proyecto gira con base al procesamiento de imágenes Landsat, análisis de índices de vegetación (NDVI, SAVI y GEMI), índices de quema (NBR y BAI) y clasificaciones a partir del algoritmo ISODATA de la escena pre-incendio y post-incendio; para obtener la herramienta de la representación temática de la distribución del área de afectación que incluye la diferencia normalizada entre bandas derivadas de los índices de quema y vegetación que permitió obtener resultados óptimos en el análisis de la quema de crudo.

Palabras clave: Áreas quemadas, clasificación, índices de vegetación, índices de quema, Landsat.

INTRODUCCIÓN

Los derrames de petróleo se han convertido en una de las principales fuentes de contaminación en ecosistemas terrestres y acuáticos, debido al desequilibrio en los procesos biológicos, físicos y químicos producidos por accidentes ocasionados durante las actividades de exploración, extracción y transporte. En los ecosistemas terrestres el esparcimiento de la mancha impide el intercambio gaseoso con la atmósfera, iniciando una serie de procesos, como evaporación y absorción que, de acuerdo con, las características del petróleo, cantidad vertida y componentes biofísicas, puede ser un proceso acelerado, desencadenador de otros eventos antrópicos como incendios forestales que suponen un inminente riesgo para las poblaciones que se abastecen de las condiciones ambientales del área.

La mayoría de los accidentes y contaminación ocurren en la fase de transporte del crudo por ductos. Los repetitivos accidentes, implican altos volúmenes de crudo derramado y, en muchos casos, los ecosistemas afectados se encuentran en una intrincada topografía para realizar las labores de control, limpieza y recuperación (Castro, 2007).

Un resumen de accidentes entre el periodo de 1993 al 2001 en México, por liberación de sustancias peligrosas al ambiente, expone que el 70,2% de los accidentes ocurren durante la fase de transporte y solo el 20,4% en las plantas industriales, atribuyéndose la mayor cantidad de emergencias ambientales con un 59,7% al transporte por ductos, 2,9% carretero, 7,2% marítimo y el ferrocarril con un 3%. (Instituto Mexicano de Transporte, 2002).

Según Atlas y Bartha (2002), en Colombia el transporte de crudo por ductos se ha visto afectado considerablemente durante el periodo de operatividad (1986 y 1998), liberando aproximadamente dos millones de barriles de crudo sobre ecosistemas terrestres y acuáticos, 7,6 veces el crudo que se derramó en el desastre del buque Exxon Valdez entre Alaska y Canadá el 24 de marzo de 1989, afectando aproximadamente 6000 hectáreas de terrenos con potencial agrícola y pecuario, 2600 kilómetros de ríos y quebradas y 1600 hectáreas de ciénagas y humedales, originando graves impactos al ambiente, a poblaciones y al sector económico.

En el municipio de Arauquita, departamento de Arauca se encuentra ubicado el yacimiento- pozo de extracción del principal oleoducto “Caño Limón-Coveñas” transportador y el generador del mayor impacto ambiental por quema de crudo, lo que obliga a realizar el seguimiento ambiental, para determinar el área quemada de las coberturas afectadas, a partir de la ubicación y propagación espacial del incendio, a través de técnicas de teledetección y el análisis multitemporal para realizar la evaluación cuantitativa y cualitativa de la afectación del área quemada por derrame de crudo en el medio ambiente.

La estimación de la afectación a coberturas presentes, se desarrolla por medio del procesamiento de imágenes del satélite Landsat, elegido por las características de las imágenes y la zona de estudio. Las imágenes se someten a la etapa de pre y procesamiento, en las que se aplican modelos matemáticos para adecuarlas y realzar las características espectrales que permitan la clasificación de los ambientes afectados con

lo que finalmente se obtendrá la caracterización del área afectada por el incendio, evaluado a partir de la revisión de estudios específicos de coberturas de la tierra realizados en la zona de influencia del oleoducto Caño Limón-Coveñas del municipio de Arauquita; puesto que el área de influencia del trazado del oleoducto, es una zona con una gran variación en sus componentes biofísicos y en su mayoría existe una gran presencia de pastos.

Posterior al procesamiento de imágenes del satélite Landsat se identifican y clasifican las coberturas presentes se determina la afectación a través del periodo de tiempo aproximadamente de un año para obtener la estimación de las áreas quemadas por derrame de crudo, donde las coberturas afectadas son: pastos 139 ha, zonas pantanosa 12 ha y bosques 7 ha.

La utilización de imágenes Landsat es una herramienta eficaz para determinar áreas afectadas por eventos antrópicos como las quemas por derrame de combustible, ya que permite la construcción de cartografía que identifique y ubique zonas potencialmente sensibles (recursos existentes, accesos, cultivos, entre otros), y es una alternativa aplicable dentro de los planes de contingencia para recuperar y contrarrestar el deterioro continuo de la calidad del medio ambiente causado por este tipo de acontecimientos en la etapa de transporte de crudo.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los derrames de crudo, se han vuelto uno de los mayores contaminantes y causantes de sensibilidad ambiental en los ecosistemas, debido a los recurrentes daños de las infraestructuras petroleras y su alta demanda que ha sobrellevado una intensa actividad de extracción y transporte de crudo que ha aumentado la descarga de excesivos volúmenes al ambiente (Severyn et al., 2003).

Los incidentes derrames de crudo e incendios como fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos a causa de explosiones en las infraestructuras petroleras, han afectado considerablemente las zonas donde se presentan estos eventos catastróficos. Los ecosistemas afectados generalmente son de gran valor ambiental y vulnerabilidad como bosques, fauna, zonas pantanosas, ríos, cultivos y cascos urbanos (Origel y Torres, 2002).

Los derrames de crudo sobre ecosistemas terrestres y acuáticos traen consigo un desequilibrio en los procesos biológicos, físicos y químicos, alterando los procesos en hábitats y paisajes.

Una vez ocurrido la descarga de crudo en el suelo; se inicia, una serie de procesos como la evaporación, disolución, dispersión, oxidación, emulsificación y sedimentación impidiendo el intercambio gaseoso con la atmosfera, que tendrán un comportamiento más o menos lento dependiendo de las características específicas del crudo, api¹, cantidad vertida, y condiciones físicas de la zona, lo que generara mayor toxicidad (Miranda y Restrepo, 2005).

En el agua, el crudo flota a diferentes concentraciones dificultando la penetración de luz en la columna de agua y reduciendo la producción de oxígeno por parte del plancton que vive flotando. La muerte y desaparición de plancton afecta el resto de las poblaciones de la cadena trófica, como aves, peces, reptiles, crustáceos, anfibios que dependen de los macroinvertebrados para su alimentación y a la comunidad de bentos que habitan el fondo del agua (Fatima et al., 2003).

Sumándose a lo anterior, la amenaza que representa para la salud pública que se abastecen de los recursos de la zona (fuentes de agua, animales etc.). Y finalmente la afectación directa de la economía debido a las pérdidas en la pesca, agricultura y disminución en las regalías.

Las frecuentes rupturas del oleoducto Caño Limón- Coveñas durante el lapso de 1985 y 1999, provocaron la liberación de crudo en la naturaleza de 2 millones de barriles, haciéndolo responsable del 92% de los impactos socio-ambientales, los cuales son particularmente serios en las cuencas del Arauca, del Catatumbo, del Magdalena y del Caribe los cuales suman 2800 Km. (Ecopetrol, 2002).

En el caso presente los derrames de crudo en Arauquita han traído consigo incendios forestales que a menudo repercuten en los hábitats causando daños ambientales de gran

1 La gravedad API, o grados API, de sus siglas en inglés American Petroleum Institute, es una medida de densidad que, en comparación con el agua y con iguales temperaturas, precisa cuán pesado o liviano es el petróleo. Índices superiores a 10 implican que son más livianos que el agua y, por lo tanto, flotarían en ésta.

importancia. Estos eventos ponen en evidencia la necesidad de estimar el área quemada para analizar la afectación en el ambiente, que son vulnerables o están en riesgo en la vida animal, vegetal y humana dentro de la zona; se utilizó tecnología de percepción remota, para ayudar en gran medida en la generación cartográfica de la distribución de la quema sobre las coberturas afectadas.

La elaboración de mapas de afectación en coberturas son claves para el proceso de planificación de las contingencias por quema de crudo puesto que contribuye a las entidades encargadas de la respuesta del accidente, comprender el comportamiento del área quemada sobre ecosistemas, para la optimización y priorización de las labores de protección, limpieza y recuperación de las áreas ecológicamente sensibles (Organización Marítima Internacional [IMO], International Petroleum Industry Environmental Conservation Association [IPIECA], Producción en Asociación con Arpel, 1996).

2. JUSTIFICACION

El presente trabajo de investigación se realiza, porque existe la necesidad de conocer la afectación de las coberturas presentes en el área de influencia del oleoducto Caño Limón-Coveñas en el municipio de Arauquita causado por el incendio forestal debido al derrame de crudo, lo que permitirá conocer la relación que existe entre los componentes biofísicos del área de estudio y el comportamiento del accidente.

La investigación contribuirá en el análisis de coberturas de la tierra, a partir de la observación de respuestas espectrales que determinan las características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

La teledetección es una herramienta útil para definir la magnitud del accidente y la caracterización de la zona, posibilita el mapeo, seguimiento y evaluación del estado de coberturas a través del tiempo, proporciona información valiosa para la observación del cambio, con la cual se pretenderá generar procesos que optimicen la planificación de contingencia frente a posibles eventos antrópicos nocivos en el ambiente.

Agregado a las consecuencias producidas por estos eventos antrópicos, la quema de crudo es un problema que lleva implícito alcances considerables, cuya magnitud puede destruir todo el desarrollo del entorno afectado.

Para mitigar el daño por quema de crudo, actual o inminente, disminuyendo los esfuerzos de contención y limpieza, la entidad ambiental encargada y la empresa implicada deben contar con información de áreas probablemente sensibles presentes en el área de influencia del oleoducto, para el manejo de la emergencia.

Se hace indispensable contar con el seguimiento en casos de incendio por derrame de crudo por medio de la captura de las imágenes en pre y post accidente, y el tratamiento ágil y eficaz, bajo la metodología que cumpla los requisitos para el seguimiento y el modelamiento de la información en productos temáticos que puedan facilitar la focalización de los esfuerzos de control y mitigación, partiendo de la identificación y cuantificación previa de las áreas sensibles que ocupa el evento y llevarse a cabo posteriormente en la implementación de planes de contingencia y preservación ya establecidos por las empresas petroleras y encargadas de la protección y calidad del medio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Determinar la extensión del área afectada por quema de crudo en el mes de septiembre de 1997 en el área de influencia del oleoducto Caño Limón - Coveñas en un sector del municipio de Arauquita, mediante imágenes Landsat.

3.2 ESPECIFICOS

- ✓ Aplicar una metodología que permita estimar el área quemada, como indicador de la afectación a las coberturas, mediante imágenes de satélite.
- ✓ Cuantificar las áreas sensibles por la propagación del accidente.
- ✓ Caracterizar temáticamente la distribución del incendio sobre las coberturas presentes.

4. MARCO DE REFERENCIA

El contenido y alcance del estudio se describirá en este capítulo mediante la exposición de los temas principales para el desarrollo de la propuesta metodológica, por medio de la conceptualización sobre temáticas, teorías y procedimientos, revisados acerca de la problemática existente en áreas afectadas por incendios forestales ocasionados por derrames de crudo.

4.1 MARCO CONCEPTUAL

✓ Principios de Percepción Remota

4.1.1 Teledetección espacial

La teledetección se define como la adquisición de información terrestre por medio de sensores remotos mediante la detección registrada y almacenada de la cantidad de energía emitida o reflejada por un cuerpo, con la finalidad de observar, procesar, analizar y extraer información de interés (Levin, 1999).

Los elementos de la superficie terrestre según sus propiedades físicas interactúan con la energía proveniente del sol, produciendo variaciones en la radiación electromagnética reflejada o absorbida y emitida de acuerdo a sus características (volumen y rugosidad), las diferentes densidades de la materia y la atmósfera son causantes de los cambios en la velocidad, longitud de onda, magnitud de la radiación, la cual dispersa la señal original en diferentes direcciones.

La captura de la energía proveniente de los elementos terrestres es recogida y almacenada en imágenes por el sensor que se encuentra a bordo del satélite. El análisis de estas imágenes permite determinar las características físicas de la materia sujetas a las variaciones con la energía incidente (López, 2012).

4.1.2 Componentes de un sistema de percepción remota

De acuerdo con Chuvieco (1996) los procesos que se involucran en la percepción remota se presentan en la Figura 1 y se definen como sigue:

A. Fuente de energía o iluminación: Es la que emite la radiación electromagnética sobre un objeto y que registra el sensor. En el caso de la teledetección pasiva la fuente principal de energía externa es el sol, mientras que en la teledetección activa es necesario que el satélite o avión contenga una fuente propia artificial emisora de energía (radar).

B. Radiación y la atmósfera: Es el proceso en que la energía grabada por el sensor se propaga a través de la atmósfera a una estación receptora, en donde los datos se procesan y se convierten en imágenes digitales.

C. Interacción con la superficie terrestre: La superficie terrestre, está compuesta de diferentes cuerpos como lo son: suelo, agua, vegetación y edificaciones, los cuales

interactúan con la radiación electromagnética originada de la fuente de energía, y la absorbe, transmite, refleja o emiten según los componentes físico químicos de los cuerpos presentes.

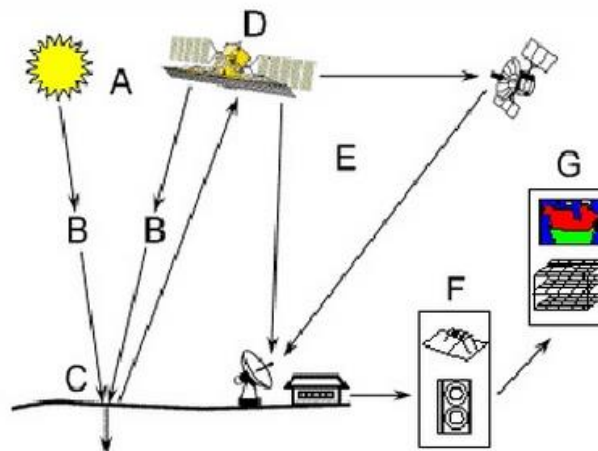
D. El sistema sensor: Está compuesto por el sensor y la plataforma que lo sostiene. El sistema tiene como función recibir los datos adquiridos de la captura la energía emitida por el cuerpo en la superficie terrestre, compilarla y almacenarla.

E. Sistema de transmisión, recepción, y proceso: El sistema está encargado de recibir la información transmitida por el sensor. Con el fin de registrar, compilar, almacenar en formato específico, para finalmente aplicar las correcciones necesarias y ser distribuida a profesionales especializados.

F. Interpretación y análisis: Es el profesional capacitado, encargado de analiza e interpreta la información suministrada por el sensor, para ser convertida en datos de tipo digital o análogo para desarrollar aplicaciones según el interés del usuario.

G. Usuario final: Es quien recibirá y utilizara la imagen procesada por el profesional capacitado, para desarrollar proyectos específicos de investigación, planeación y gestión.

Figura 1. Componentes de un sistema de percepción remota.



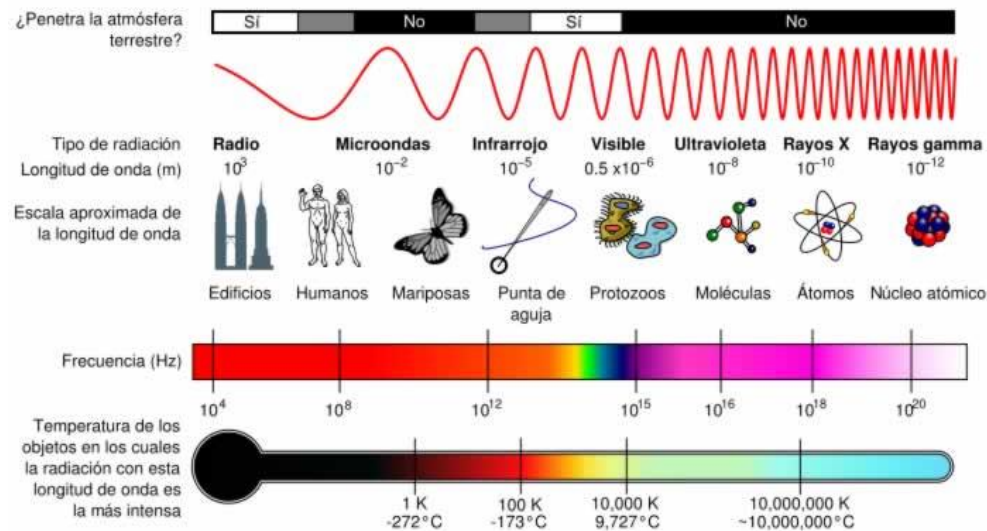
Fuente: Chuvieco, 1996.

4.1.3 Espectro electromagnético

Se denomina espectro electro magnético al conjunto de todas las longitudes de onda que adopta la radiación como se ilustra en la Figura 2. El espectro de un objeto se representa como la distribución de la radiación electromagnética que refleja, emite o absorbe una sustancia. Puede ser observado utilizando herramientas estereoscópicas en bandas espectrales en las que se identifica la materia, (velocidad, longitud y frecuencia) (China, 2002).

La onda electromagnética se caracteriza por la longitud de onda y su frecuencia. En el espectro electromagnético es posible identificar, longitudes de ondas menores como los rayos gamma y los rayos x, ultravioleta seguidas de un rango un poco más amplio conocido como el espectro visible, compuesto por las longitudes de onda denominadas azul, verde y rojo, posteriormente se identifican las longitudes del infrarrojo entre las que se identifican el infrarrojo cercano, infrarrojo medio y el térmico y luego las microondas, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como lo son el radio (Chinea, 2002).

Figura 2. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda con ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro.



Fuente: Chuvieco, 1996.

4.1.4 Interacción de la energía con la superficie terrestre

La energía electromagnética que choca con la materia después de traspasar la atmosfera, independiente de sus características (sólido, líquido, o gas) se denomina energía incidente. Produciéndose diferentes tipos de interacciones sobre la cubierta terrestre debido a las variaciones de la radiación incidente. Estas son: absorción, transmisión y reflexión, como se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Interacciones de la energía con la hoja.



Fuente: Gutiérrez & Nieto, 2006.

Absorción [A]: ocurre cuando la mayor parte de la energía de la radiación incidente es absorbida en el calentamiento de la materia.

Transmisión [T] sucede cuando la radiación incidente atraviesa la materia, transmitiendo la energía a través de diferentes densidades, causando variaciones en la velocidad de la radiación electromagnética.

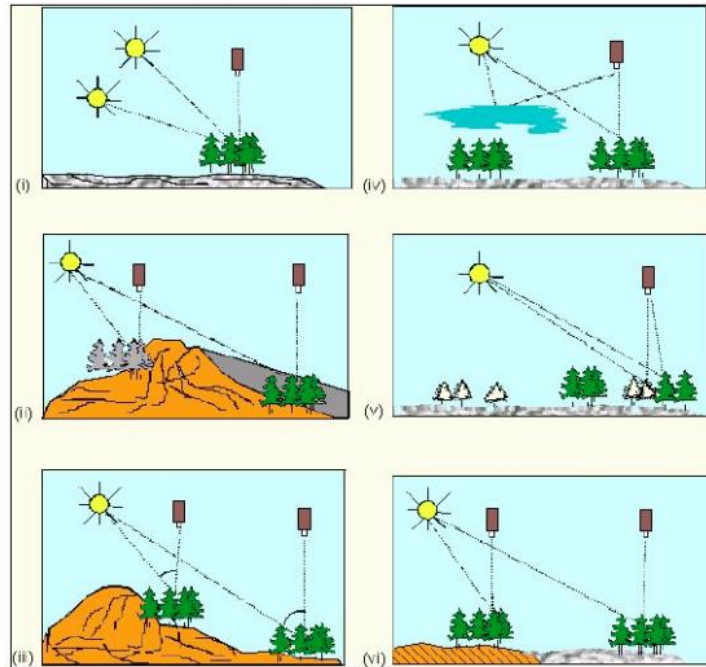
La Reflexión [R] Sucede cuando la energía incidente regresa desde la superficie de la materia. Teóricamente, la reflexión se puede dar de dos tipos: especular, que sucede cuando la superficie es perfectamente lisa; y la difusa que ocurre por lo contrario cuando la superficie es totalmente rugosa; en el primer caso la mayor parte de la energía se refleja en dirección única, mientras que para las superficies rugosas la energía es reflejada de manera uniforme hacia todas las direcciones. Sin embargo, las cubiertas en general se comportan entre estos dos tipos de reflexión.

La cantidad de **energía incidente [I]** que interactúa y es absorbida por la materia es proporcional a la longitud de onda y las características físicas - químicas de esta (Gutiérrez y Nieto, 2006).

4.1.5 Características espectrales de la vegetación

La caracterización espectral de la vegetación es complejo debido a los diferentes parámetros y factores que influyen en la radiancia captada por el sensor Chuvieco (2002) ilustrados en la Figura 4, como lo son los factores: condiciones atmosféricas, cubiertas adyacentes y la geometría de observación, determinada por el ángulo de elevación solar y el ángulo de inclinación del sensor respecto al sol (Reuter, 2009), agrupados en los que están relacionados con la respuesta espectral de una hoja, el tipo y cantidad de pigmentos, la estructura interna de la hoja y su contenido de agua; la arquitectura y características geométricas de la planta y por último, los aspectos relacionados con la localización de la planta.

Figura 4. Factores que modifican la reflectividad característica (i) Ángulo de elevación solar, (ii) orientación de las laderas, (iii) pendiente, (iv) atmósfera, (v) Variaciones de la cubierta, (vi) sustrato.



Fuente: Reuter, 2009.

4.1.6 Comportamiento espectral de la vegetación

Cuando la radiación choca en la hoja de la planta y es posteriormente reflejada. Se produce una dispersión difusa, que consistirá en la dispersión de la radiación en todas las direcciones y estará sujeta a la estructura de la hoja, la cual definirá la componente direccional o especular.

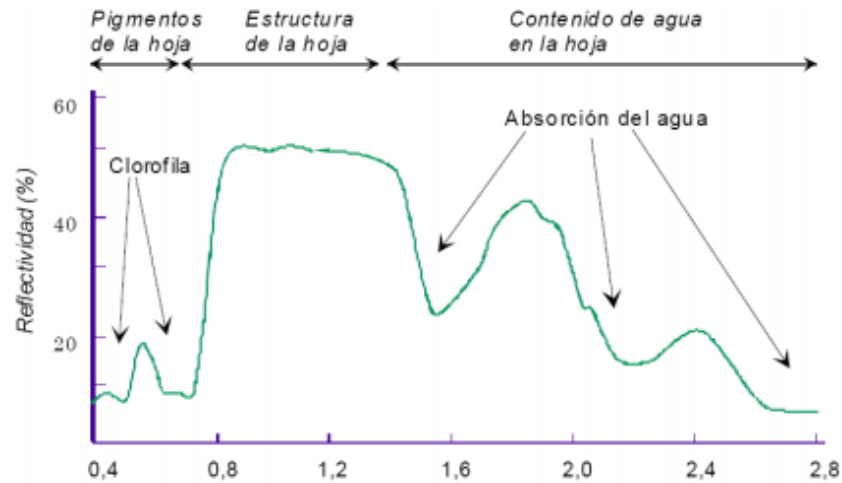
La energía reflejada cambia con la longitud de onda y se determina por la estructura interna de la hoja, es decir: cantidad de agua que contiene la planta y sus pigmentos presentes en la hoja como clorofila, carotenos y xantofilas.

A la energía reflejada y captada por el sensor se le denomina firma espectral. En la Figura 5 se presenta de manera esquemática la firma espectral de una hoja en la que se identifica el porcentaje de reflectividad de una hoja en función de la longitud de onda.

Las diferentes especies vegetales pueden presentar distinto contenido en agua como consecuencia de las características específicas, también puede variar en una misma especie debido al estado fisiológico. El contenido de agua ejerce, no solo un efecto directo en la reflectancia del visible y del infrarrojo (IR) medio, sino también un efecto indirecto en la reflectancia del visible y del IR próximo debido a su efecto de la turgencia celular², por ello una disminución del contenido del agua produce un aumento de la reflectancia en el conjunto de espectro (Reuter, 2009).

² Es el fenómeno por el cual las células al absorber agua, se hinchan, ejerciendo presión contra las membranas celulares, las cuales se ponen tensas.

Figura 5. Firma espectral de la hoja.

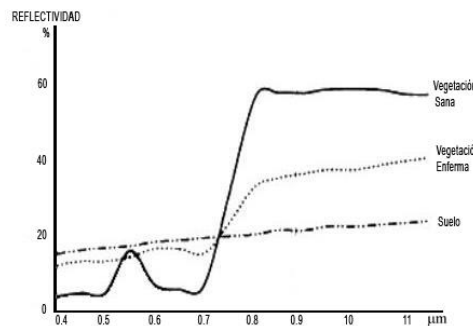


Fuente: Reuter, 2009.

Las hojas de las plantas también pueden presentar carencias en su estado nutritivo, esto puede manifestarse en una disminución de clorofila o en una alteración de su estructura anatómica (Reuter, 2009).

La deficiencia en nitrógeno aumenta la reflectancia en el visible (por la disminución del contenido en clorofila), en tanto se produce una disminución de la reflectancia en el IR próximo y medio, debido a la disminución del número de capas celulares Figura 6 (Reuter, 2009).

Figura 6. Firmas espectrales de la vegetación sana, vegetación enferma y del suelo.



Fuente: Reuter, 2009.

4.1.7 Reflectancia de cubiertas vegetales

La reflectancia de las cubiertas vegetales es el conjunto de los factores que intervienen y combinan la reflectancia entre las plantas y suelo alrededor. Proporcional al desarrollo de la vegetación el aporte del suelo se reduce. Por lo tanto, durante el crecimiento de las plantas, la reflectancia del visible y del IR medio se reduce a medida que aumenta la del IR cercano. En consecuencia se observa un efecto inverso durante el crecimiento y envejecimientos de la cobertura. (Reuter, 2009).

De igual forma, proporcional al crecimiento de la cobertura vegetal, se disminuye la influencia del suelo alrededor gradualmente.

El espectro de la reflectancia de las cubiertas vegetales estará influenciado por el suelo alrededor. Es decir, si la cantidad de vegetación es menor a la que ocupa el suelo en el espectro de reflectancia, las características que arrojará la reflectancia estarán asociadas en su mayoría al suelo que a las cubiertas vegetales (Reuter, 2009).

4.1.8 Imágenes Landsat

Landsat fue el primer programa realizado para la observación de la tierra y sus fenómenos por los Estados Unidos – NASA. A partir de los años 70 la NASA inició su programa de satélites y puso en órbita al Landsat 1 en 1972, posteriormente lanzó el Landsat 2 en 1975, tres años después fue lanzado el Landsat 3, el Landsat 4 fue lanzado en 1982 con el sensor TM a bordo igual que el Landsat 5 que fue puesto en órbita en 1984, el satélite Landsat 6 presentó fallas al ser lanzado en 1993 y no alcanzó órbita. Solo hasta 1999 se colocó, el Landsat 7 con un sensor mapeador temático mejorado (ETM+) y finalmente en el 2013 se puso en órbita el satélite Landsat 8. Los satélites Landsat 4 y 5 finalizaron operación en 1993 y 2011, respectivamente.

El sensor TM de captura multiespectral fue desarrollado con el fin de ofrecer una mejor resolución espacial y espectral compuesta por siete bandas 3 en el óptico (bandas 1,2,3), tres en el infrarrojo (4, 5, y 7) una en el infrarrojo térmico (banda 6), con una capacidad media para la discriminación entre cubiertas terrestres y precisión radiométrica, apta para la captura de escenas de 30m en el visible e infrarrojo medio, 185 Km para todas las bandas espectrales (Dirección General de Geografía y Medio Ambiente S.A, 1984).

4.1.9 Índices de vegetación

Los índices de vegetación son empleados para medir el comportamiento fenológico de la vegetación. Permitiendo discriminar entre la vegetación sana o enferma que se encuentra bajo algún desequilibrio, como lo son el estrés hídrico y plagas; a partir de datos espectrales (López, 2012).

4.1.10 Clasificación digital

La clasificación es un proceso digital que consiste en la categorización temática de la imagen, por medio del procedimiento donde se pasan los niveles digitales (ND) continuos medidos por el sensor a la agrupación de los niveles digitales (pixel) espectralmente semejante del espacio multiespectral a clases. La selección de píxeles clasificados en categorías se pueden describir en cubiertas de datos cuantitativos (nominal y ordinal) y cualitativos (continuas y discretas) (Chuvieco, 1996).

4.1.11 Incendios forestales

El incendio forestal es aquel que se produce y se extiende principalmente sobre zonas de cuantiosa vegetación.

Los mayores generadores de deforestación y degradación sobre los ecosistemas son los incendios forestales. Los cuales son generados en un 90% de manera antrópica (el hombre) a nivel mundial. Afectando de manera negativa al medio ambiente debido a la

pérdida de la biodiversidad, cobertura vegetal – erosión y las emisiones de CO_2 que perjudican los hábitats de flora y fauna silvestre (Comisión Nacional asesora para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales, 2002).

4.1.12 Derrames de crudo

Los derrames de crudo se puede considerar que consisten en la liberación y/o introducción, no planificados, de petróleo, causados generalmente por la colisión de buques petroleros, plataformas de perforación, pozos y la ruptura de oleoductos o ductos, que contaminan en una gran medida los ecosistemas, principalmente el agua y la tierra, afectan la vida animal y vegetal considerablemente, si no se detiene el derrame a tiempo. La preocupación sobre el impacto de los derrames de petróleo normalmente se deriva específicamente de la posibilidad de daño a largo plazo para biosfera y el riesgo que representa para cualquiera de sus habitantes del sector de influencia.

4.1.13 Contaminación ambiental

Se denomina contaminación ambiental a la introducción de cualquier sustancia físico – química o biológico en el ambiente que interfiere en el funcionamiento y equilibrio del medio ambiente y las personas, generando daños definitivos en la zona.

Las consecuencias de este desequilibrio será nocivo la para la salud, seguridad o bienestar de los habitantes del sector como también los demás seres vivos, como la fauna y flora: ya que la contaminación puede presentarse en diferentes ambientes o simultáneamente en el aire, agua y suelo (Aguilar, s,f).

La contaminación generada de manera antrópica puede conllevar a múltiples impactos negativos de pérdida, degradación y alteración de la calidad física, química y biológica de corrientes de agua y de la cantidad de aguas que estas transportan, inundación de terrenos, suelos, vegetación acuática, inestabilidad de terrenos, calidad del aire, generación de residuos, fragmentación de hábitats, extinción, muerte o desplazamiento de fauna, desplazamiento de población, afectación de las actividades socioeconómicas, generación de conflictos sociales, pérdida de infraestructura, disminución de empleo, entre otros (Sofos Grupo de Estudio y Trabajo Académico, 2013).

4.2 MARCO TEORICO

Se seleccionan los elementos teóricos más relevantes para el desarrollo del proceso metodológico que conducirán a lograr el objetivo general del estudio.

4.2.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El fundamento del NDVI es el contraste que se genera entre la reflectancia de las radiaciones roja e infrarroja, mide la relación de la energía reflejada por los objetos terrestres. Aplicado a las cubiertas vegetales, el índice arroja valores de intensidad del verde de la zona, mide la proporción de vegetación presente en la zona y su estado fenológico y salud. El NDVI es un índice no dimensional, por eso al aplicar la Ecuación (1) sus valores se distribuyen en el intervalo de -1 a +1.

Los valores que están debajo de 0,1 pertenecen a cuerpos de agua y a suelo desnudo, a diferencia de los valores cercanos a 1 que indican alta actividad fotosintética

correspondientes a zonas de matorral, el bosque templado, la selva y la actividad agrícola, Ecuación (1) (Meneses, 2011).

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad (1)$$

Donde:

ρ_{IRC} = Es la reflectividad del infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 micrones)

ρ_R = Es la reflectividad del rojo (0,6 a 0,7 micrones)

4.2.2 Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

Es propuesto por Huete (1988). Este índice fue realizado para minimizar la influencia de los efectos del brillo del suelo sobre la señal de la vegetación utilizando el factor de corrección L y se calcula por medio de la Ecuación (2).

L presenta variación según las características de reflectancia en la zona (color y brillo). El factor de ajuste se define en la escala de 0,25 a 1. El factor L elegido estará sujeto a la densidad de la vegetación a evaluar. Para densidad muy escasa, Huete (1988) recomienda utilizar un factor L de 1,0; para un rango intermedio, 0,5 y para uno alto, 0,25 (Abaurrea, 2013).

$$SAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} - \rho_R + L} * (1 + L) \quad (2)$$

Donde L= Factor de ajuste del suelo, constante para ajustar la línea vegetación suelo al origen, 0,5.

ρ_{IRC} = Es la reflectividad del infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 micrones)

ρ_R = Es la reflectividad del rojo (0,6 a 0,7 micrones)

4.2.3 Índice de vegetación global (GEMI)

El índice de vegetación global (GEMI, por sus siglas en inglés), es un índice no lineal y es similar al NDVI, este fue desarrollado especialmente para reducir los efectos de las perturbaciones atmosféricas y color en el cambio del suelo y ser aplicado en zonas de vegetación escasa, pero no en suelo desnudo, debido a que a el ruido del suelo hace que el GEMI no funcione, puesto que el índice que minimiza los efectos atmosféricos es altamente sensible al suelo desnudo y por lo cual el índice no idóneo aplicarlo en zonas de suelo árido (Pinty y Verstraete, 1992).

Para aplicar este índice es necesario primero hallar el valor de la variable η por medio de la Ecuación (4) y de esta manera obtener el índice global introduciendo el valor de la variable obtenido en la Ecuación (3) en donde se alcanzaran los valores distribuidos entre 0 y 1.

$$GEMI = \eta \times (1 - 0,25 \times \eta) - \frac{\rho_R - 0,125}{1 - \rho_R} \quad (3)$$

Donde:

ρ_R = Es la reflectividad del rojo (0,6 a 0,7 micrones)

ρ_{IRC} = Es la reflectividad del infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 micrones)

η es:

$$\eta = \frac{2 \times (\rho_{IRC}^2 - \rho_R^2) + 1,5 \rho_{IRC} + 0,5 \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + 0,5} \quad (4)$$

4.2.4 Cociente normalizado de quema (NBR)

El coeficiente normalizada de quema (NBR, por sus siglas en inglés) propuesto por (Key y Benson, 1999), se basa en el contraste espectral entre el infrarrojo cercano que es sensible al contenido del agua en el suelo y clorofila y el infrarrojo onda corta. En un ambiente post-incendio, las superficies quemadas son poco reflectivas en el infrarrojo cercano (IRC), asociado a las alteraciones estructurales de la vegetación; en contraste, con el infrarrojo medio de onda corta (SWIR), que son muy reflectivas debido a los cambios en el contenido de agua en el suelo y la cubierta vegetal.

El NBR identifica las superficies afectadas por el fuego a partir de la diferencia normalizada de dichas bandas descrita en la Ecuación (5), en un intervalo de variación contenido entre los valores de -1 a +1; los valores más bajo estarán asociados a las áreas quemadas, debido a que se presentara disminución en la reflectividad del infrarrojo cercano (Cocke et al., 2005).

$$NBR = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}} \quad (5)$$

Donde

ρ_{IRC} = reflectividad del pixel i en la región del infrarrojo cercano.

ρ_{SWIR} = reflectividad del pixel i en la región del infrarrojo medio de onda corta.

4.2.5 Índice de área quemada (BAI)

El índice de área quemada (BAI, por sus siglas en inglés), tiene como objetivo la detección de áreas quemadas en una zona determinada. Se calcula a partir de la Ecuación (6) utilizando las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Mide la distancia espacio espectral de cada pixel a un valor de referencia, valor al cual convergen las áreas afectadas por el fuego, donde domine la señal del carbón. El valor del índice será mayor cuanto menor sea la distancia espectral y corresponderá a las zonas quemadas (Martín y Chuvieco, 2001).

$$BAI = \frac{1}{(PCr - \rho_r)^2 + (PCir - \rho_{ir})^2} \quad (6)$$

Donde PCr y PCir son los valores de convergencia para las bandas del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente estos valores de convergencia se definieron, respectivamente

como 0,1 y 0,06 a partir del análisis de una zona quemada conocida (Martín y Chuvieco, 1998).

4.2.6 Clasificación no supervisada ISODATA

La clasificación no supervisada – CNS con el algoritmo ISODATA (Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm), se desarrolla mediante el agrupamiento de los ND (píxeles) similares en todas las bandas en (N) clases espectrales, las cuales corresponderán a un tipo de cobertura de la zona de estudio.

Es una técnica de clasificación en que la imagen a partir de un número de clases definidas por el analista en clases desconocidas que posteriormente serán nombradas. En el proceso de clasificación se definen la cantidad de iteraciones que se consideren necesarias, las cuales recalcula los promedios y reclasifica los píxeles de la imagen con respecto a los nuevos promedios (Richards, 1995).

4.2.7 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada corresponde a la selección de píxeles que representan los patrones de los tipos de cobertura (áreas de entrenamiento), por medio del conocimiento a priori de la zona de estudio, identificados en fuentes auxiliares como mapas.

La fase de entrenamiento consiste en la identificación de píxeles representativos en el área de entrenamiento para el cálculo de la medida espectral y su posterior asignación. (Chuvieco 1996).

4.2.8 Matriz de confusión

La matriz de confusión (C), contingencia o de error, es una herramienta que se emplea con el objetivo de comparar dos clasificaciones, por medio del ordenamiento matricialmente cruzado de las clases para la evaluación de los errores.

Se organizan en las columnas las clases definidas por el analista y en las filas las categorías verdaderas o de referencia que tomaran de una cartografía realizada anterior, la diagonal de la matriz arrojará las categorías clasificadas correctamente.

El error obtenido en las columnas se llama error de inclusión o comisión (E_c) y representa las áreas que fueron asignadas clasificadas incorrectamente, es decir, no pertenecen a esa clase. En las filas se organizan las clases de referencia; el error asociado a cada fila se denomina error de exclusión u omisión (E_o) y representa las áreas que no fueron asignadas a dicha categoría aun cuando pertenecían a ella (Aronoff, 1975; Story y Congalton, 1986). Con la matriz de confusión se generan tres tipos de exactitud: global, del usuario y del productor, descritos en la Tabla 1. Para corregir los tipos de exactitud se utilizara el coeficiente kappa (CK).

Tabla 1: Tipos de exactitud para la validación de clasificación de imágenes.

Exactitud	Ecuación	Explicación
Global (EG)	$EG = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad (7)$ <p>x_{ii}: diagonal mayor de C, N: número total de puntos de muestreo, r: número de filas de la matriz.</p>	Indica la exactitud del conjunto de clases del método a evaluar.
De usuario (EU)	$EU = \frac{x_{ii}}{x_{ii}+} * 100 \quad (8)$ <p>X_{ii}: diagonal de dicha fila, $x_{ii}+$: totales marginales de la fila i</p>	Es el acertamiento de una clase en particular, respecto a toda la clasificación.
De productor (EP)	$EP = \frac{x_{ii}}{x_{ii}+i} * 100 \quad (9)$ <p>X_{ii}: diagonal de dicha columna, $x_{ii}+i$: totales marginales de la columna i.</p>	Es el acertamiento de una clase particular, respecto a la clasificación a evaluar.

Fuente: Rodríguez, 2011.

4.2.9 Coeficiente estadístico Kappa

Cuantificación de la exactitud de clasificaciones. Este coeficiente, propuesto por Jacob Cohen en 1960 (DOU et al., 2007), es un estadístico que mide la concordancia de dos clasificaciones. Es empleado para observar la similitud de dos clasificaciones de imágenes utilizando la Ecuación (10), (LI et al., 2009; DOU et al., 2007).

$$CK = \frac{\sum_{i,j=1}^r x_{ij} - \sum_{i,j=1}^r (\sum x_i * \sum x_j)}{N^2 - \sum_{i,j=1}^r (\sum x_i * \sum x_j)} \quad (10)$$

En donde r es el número de filas en la matriz; x_{ij} , número de píxeles de la fila i, columna j, es decir la diagonal mayor; x_i , fila i; x_j , columna j y N el total de píxeles de la matriz.

El valor de coeficiente Kappa puede variar de 0 a 1, entre más cercano este a 1, la concordancia de las dos clasificaciones es muy alta. De acuerdo al valor obtenido, éste índice definirá el resultado en un rango de seis, como se muestra en la Tabla 2 (Cerdeja y Villarroel, 2008), de acuerdo a la ubicación de los resultados validados, se definirá si se puede rechazar o aceptar la nueva clasificación evaluada.

Tabla 2. Categoría de concordancias de validación para el coeficiente Kappa

Rango	Concordancia
0	Nula
0,01 – 0,02	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Considerable
0,81 – 1,00	Casi Perfecta

Fuente: Cerda y Villarroel, 2008.

4.3 MARCO REFERENCIAL

Reducir el riesgo de desastres como consecuencia de derrames de petróleo es esencial para proteger el ambiente y minimizar las pérdidas de valiosos recursos naturales, el incremento de los gases de efecto invernadero en la atmosfera, las consecuencias sobre los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos y el aumento en la erosión son algunas de las razones por lo que los incendios por derrame de crudo o de forma natural son considerados como una de las principales causa del cambio climático (Levine, 1996).

Los incendios forestales, producto del derrame de petróleo provocan una serie de cambios físicos (reducen o desaparecen la cubierta vegetal y alteran los contenidos de humeado y clorofila), generan efectos del color en la superficie y cambios en los patrones de efectividad (Pereira y Seltzer, 1993).

La observación constante de las áreas probables de derrames e incendios es un componente significativo dentro de los procedimientos de gestión eficaz de los incendios ambientales relacionados con la industria del petróleo (Jha et al., 2008); la gestión eficaz de los incendios forestales requieren el conocimiento concreto y oportuno de la superficie total quemada, el tipo de bosque, y la distribución y la dinámica del fuego (Whitto et al., s.f).

La teledetección como herramienta de observación de la superficie terrestre, por medio del uso de imágenes de satélite y bandas del espectro electromagnético, permite la discriminación áreas quemadas (Chuvieco, 2002). De acuerdo a lo anterior, las imágenes de satélite son una opción apropiada para la detección, análisis y monitoreo del impacto ocasionado por incendios forestales (Navarro et al., 2005).

En la diferenciación espectral áreas quemadas es conveniente discriminar la cubierta de interés, carbón y cenizas con respecto a las provenientes por alteraciones en la vegetación. En este sentido estos dos tipos de señal una será más alterable que la otra, debidos a que; la primer señal producida por el incendio de la vegetación se encuentra

sujeta a la reducción en un espacio temporal corto según las condiciones meteorológicas. La segunda es más duradera puesto que permite hacer la discriminación del área afectada, pero menos clara porque la disminución o eliminación de la cubierta vegetal puede estar dada por otros factores: podas, talas, erosión, estrés en la vegetación o fitopatología (Pereira et al., 1999).

Teniendo en cuenta lo anterior, las áreas quemadas recientemente presentarán baja reflectividad en las bandas del visible (VIS) a causa de las alteraciones severas en la vegetación y la señal del carbón y cenizas, similares al comportamiento de cubiertas como agua, sombra de nubes, zonas pantanosas y bosques densos (Pereira et al., 1999). Estas similitudes de reflectividades tanto de clorofila como de carbón y cenizas, hacen que se disminuya la posibilidad de trabajar solo con el (VIS), puesto que su discriminación no es eficaz.

El infrarrojo cercano (IRC) es la región del espectro donde la señal de las áreas quemadas es clara, mayormente por la cantidad de carbón y ceniza en el suelo, la cual ocasiona baja reflectividad (White et al., 1996).

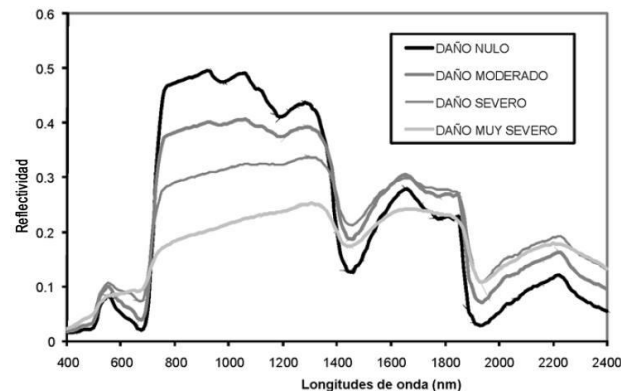
La respuesta espectral sufre cambios en la vegetación quemada, es decir la reflectividad aumenta en el VIS a mayor pérdida de clorofila, mientras que en el SWIR la reflectividad aumenta según la disminución de los contenidos de agua en una cobertura, siendo la reflectividad de esta última mayor que la del VIS y quedando claro que la reflectividad será mayor en superficies sanas y agua que en las coberturas afectadas como: suelos erosionados y áreas urbanas (Pereira et al., 1999).

En conclusión, las alteraciones provocadas en la vegetación a causa de incendios, producirán el aumento de la respuesta espectral en el visible (VIS) e infrarrojo medio (SWIR) y disminución en el infrarrojo cercano (IRC) como se aprecia en la Figura 7 (White et al., 1996).

Opazo & Rodríguez (2007) a partir del análisis y verificación multitemporal de las variaciones espaciales de índices espectrales de vegetación, pre y post-incendio realizan la discriminación de áreas quemadas, en vista que las coberturas vegetales mayormente son las afectadas por incendios forestales.

Por otro lado han sido también generados índices espectrales adaptados a la señal del carbón para la evaluación de áreas quemadas, con el propósito de evitar la confusión y disminuir los errores por comisión entre coberturas de comportamiento semejante, como se describe anteriormente. En este tipo de estudios, los índices que ampliamente han sido aplicados son el Coeficiente Normalizado de Quema (NBR, por sus siglas en inglés) (Key y Benson, 1999) y el índice de Área Quemada (BAI, por sus siglas en inglés) (Martín y Chuvieco, 1998); así mismo algunos autores han obtenido resultados satisfactorios con otros índices como el GEMI, MIRBI Y SAVI (Pereira, 1999; Trigg y Flasse, 2001; Chuvieco y Palacios, 2002), por sus fiables resultados.

Figura 7. Cambios que experimenta la firma espectral de la vegetación en relación al nivel de daño sufrido por incendio.



Fuente: Santis y Vaughan, 2009.

El factor más relevante para la elección del índice de área quemada a utilizar es el tipo de ecosistema que estará sujeto a características específicas de humedad del terreno según la época del año; como los mostradas por algunos estudios anteriormente realizados, las diferencias estarán asociadas al tipo de vegetación impactada (Sifakis et al., 2004; Parisien et al., 2006; Chuvieco et al., 2007 y Loboda et al., 2007).

Por lo cual (Opazo y Rodríguez, 2007) infieren que para definir el umbral entre quemado y no quemado se debe utilizar información obtenida de zonas quemadas previamente identificadas, de ellas se extrae un valor que es utilizado para la obtención de los perímetros quemados, o bien de los píxeles semilla³ que posteriormente son la base para la obtención de la cartografía en los algoritmos ejecutados de crecimiento de las regiones con diferentes criterios de homogeneidad que definirá la segunda fase. Este valor es difícilmente generalizado especialmente cuando se trata de zonas muy extensas con gran diversidad de la vegetación.

A partir de este contexto se desarrolla el proyecto, con el fin de determinar la extensión del área afectada por quema de crudo a través del análisis multitemporal de índices de vegetación NDVI, SAVI Y GEMI, interpretación de área quemada (índice BAI y NBR) y clasificación del área.

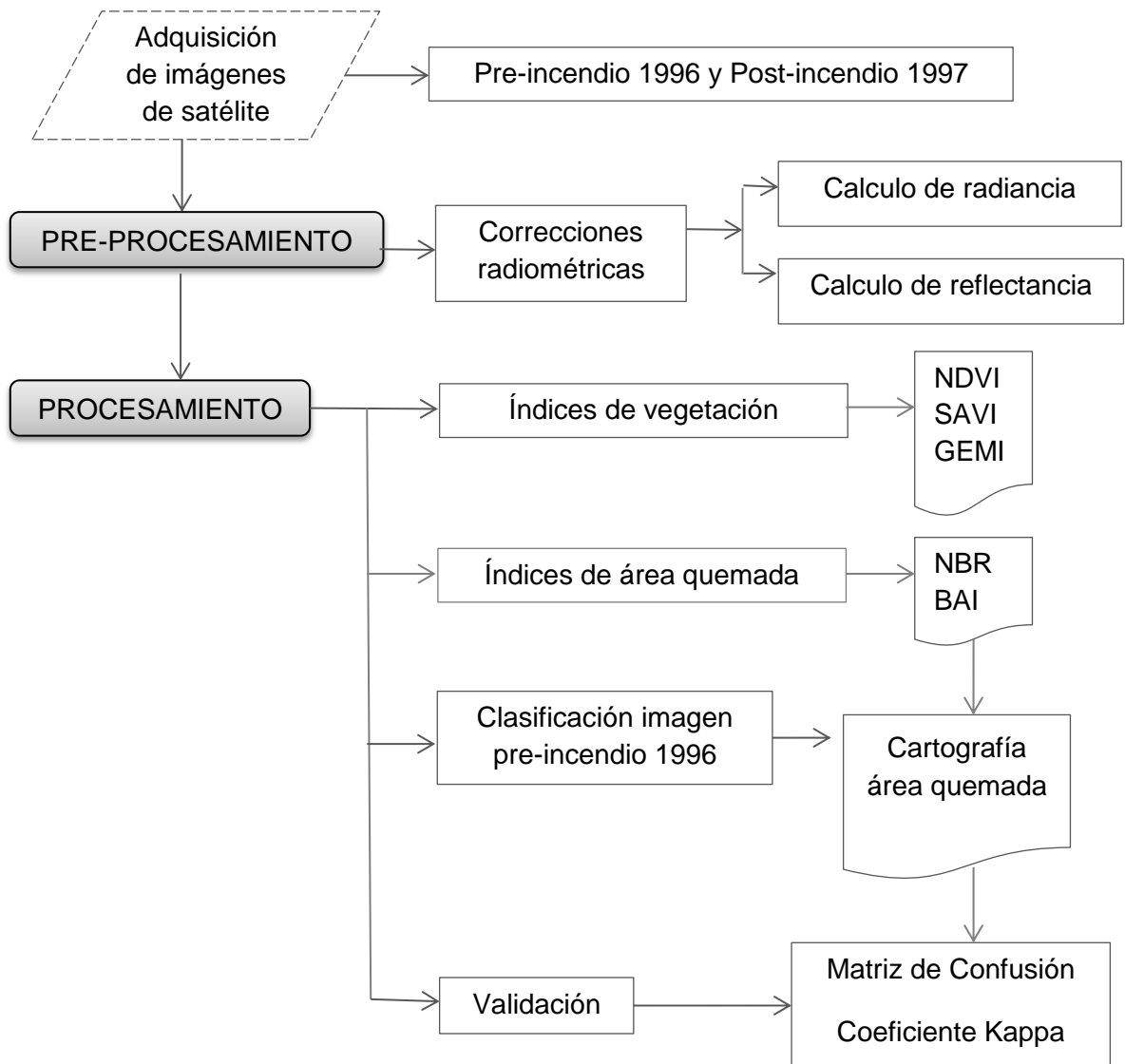
5. MARCO METODOLÓGICO

Con el ánimo de alcanzar los objetivos planteados con los que se pretende resolver la problemática en los capítulos anteriores, se exponen los procesos metodológicos finalmente elegidos a partir de la revisión bibliográfica. En la Figura 8, se sintetiza según el orden en que se desarrollan y se obtendrán los resultados para estimar el área de afectación por quema de crudo.

³ Son los píxeles que tiene las más alta probabilidad de estar quemados, característicos de un área quemada-umbral.

Inicialmente se realiza la adquisición de imágenes de satélite pre-incendio y post-incendio, las cuales son sometidas a un pre-proceso de alistamiento; re-proyección, conversión de ND a valores de reflectancia y definición de sub escena.

Figura 8 Proceso metodológico para la identificación de área quemada por quema de crudo.



5.1 ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Arauquita está ubicado en la República de Colombia sobre la margen derecha del río Arauca en el sector norte y centro del departamento de Arauca y tiene una extensión territorial de aproximadamente de 3.281,23 km².

El Municipio de Arauquita pertenece a la cuenca del río Orinoco. Cuenta con abundantes cursos de agua, que nacen en su mayoría en la Cordillera Oriental y corren en dirección Este a través de un terreno plano, lo que origina en su trayecto numerosos ríos y caños secundarios. La gran riqueza hídrica está representada por lagunas y humedales así como por numerosos ríos, caños y quebradas que bañan el municipio. Entre los principales ríos o caños están el río Arauca, el Lipa, el Ele y el río Caranal; estas arterias fluviales conforman las principales cuencas y subcuencas presentes en el municipio. En la zona de estudios ilustrada en la Figura 10, se encuentra ubicado el complejo petrolero de Caño Limón, en donde se explota e inicia el transporte de hidrocarburos en oleoductos por parte de la Asociación Cravo Norte conformada por la Occidental de Colombia.

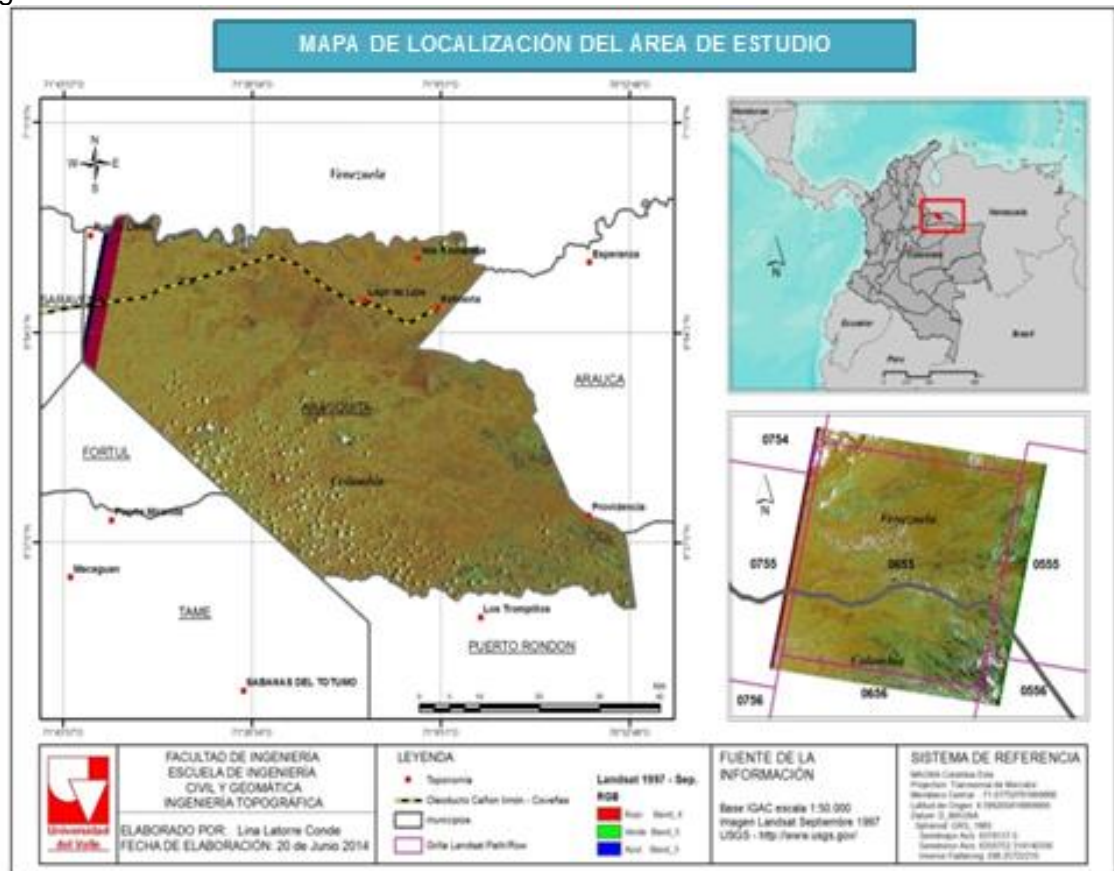
El yacimiento petrolero se encuentra ubicado en el municipio de Arauquita, departamento de Arauca, próximo a la frontera con Venezuela, iniciando desde este el trayecto a lo largo del país, recorriendo 780 km hasta el municipio de Coveñas Sucre en dirección a la costa Caribe. Puntualmente, el estudio se desarrolló en el área de mayor afectación por el evento registrado en el kilómetro 47 del trazado del oleoducto.

En el proceso investigativo para la determinación de la zona de estudio fue importante contar con la información histórica detallada de derrames de petróleo en donde se describen la ubicación del tramo afectado y peligros (incendios y explosión, entre otros), suministrados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y presentada en los Anexos; debido a que, para la zona de estudio el registro histórico 2004 – 2012 no coinciden con la resolución temporal del sensor con la fecha de accidentes ocurridos; fue necesario investigar en otras fuentes como periódicos, de tal manera que la información del evento se ajustara con la toma del sensor. Estableciéndose así para el caso de estudio trabajar con imágenes posteriores al accidente ocurrido el día 14 de septiembre de 1997; donde se registra una explosión sobre el oleoducto en parte rural, publicado por uno del periódico nacional (El Tiempo, 1997).

A partir de la obtención de la escena con la que se trabajar se hace el estudio preliminar de las zonas donde existe una alta incidencia de incendios forestales de manera natural, por medio del mapa coberturas 2009 y las tres unidades del paisaje (altillanura, sabana de pie de monte y sabanas inundables) presentes en la región de Orinoquia; con el propósito de seleccionar y asegurarse que la zona elegida para el proyecto solo se presenten incendios provocados por derrame de crudo.

Identificándose así, que el índice de quema más alto se presenta en la altillanura, mientras que en las zonas inundables del municipio de Arauquita se registra un porcentaje bajo como se describe en la tabla 3.

Figura 9. Localización área de estudio.



Contrastando la información anteriormente expuesta con el estudio de áreas quemadas en Colombia realizado en fechas 2001-2007 por Anaya y Chuvieco, (2010). Se observa en la distribución espacial de proporción quemada, que la zona del municipio de Arauquita a estudiar se encuentra en 0 en el rango de 0 a 100 de posibilidades de quema natural, razón por la cual se seleccionó como zona de estudio.

5.2 MATERIALES

Es necesaria la adquisición de información que permita desarrollar la etapa de procesamiento que conducirá a alcanzar los objetivos planteados en el proyecto y obtener los resultados esperados. Se utilizaron los siguientes materiales:

5.2.1 Imágenes Landsat

El par de imágenes Landsat 5 TM, adquiridas del visualizador Glovis, corresponden a las fechas Septiembre 30 de 1996 y 17 de septiembre de 1997, en el path/row-6/55 con coordenadas geográficas centrales $\phi 7^{\circ}13'36''$ N – $\lambda 70^{\circ}46'19''$ O, sistema de referencia WGS84; cada imagen está compuesta por siete bandas espectrales, con resolución espacial de 30m para las bandas de la 1-5 y 7 y 120m para la banda 6 y resolución temporal de 16 días. Especificaciones del sensor se indican en la Tabla 5.

5.2.2 Información espacial

Se utilizó cartografía IGAC suministrada por la Biblioteca Mario Carvajal correspondiente a: límites municipales, vías, toponimia, red de drenaje, casco urbano, refinerías y trazado del oleoducto, para la ubicación y delimitación municipal de la zona y tramo. Toda la cartografía en formato Shapefile y dwg a escala 1:500.000, los cuales son fundamentales para el proceso de georreferenciación, primer corte de la escena en dimensión municipal y definición de la ventana de interés (área quemada) ubicada en las coordenadas superior derecha ϕ 7°3'20" N – λ 71°37'50" O, inferior derecha ϕ 6°51'40" N – λ 71°37'50" O, superior izquierda ϕ 7°31'00" N – λ 71°24'50" O, inferior izquierda ϕ 6°51'40" N – λ 71°24'50" O; a partir de la localización del segmento del trazado de interés (comprendido en el tramo entre el kilómetro 40 al 55) y focalización del área afectada visualizada e interpretada con la aplicación de los índices de vegetación, para el accidente registrado en el kilómetro 47 del oleoducto Caño Limón-Coveñas.

Cartografía de las unidades del paisaje región Orinoquia y zonas quemadas 2001, para verificar el comportamiento de incendios ocurridos de manera antrópica para el municipio, explicado en la Tabla 3.

Coberturas de la tierra CORINE LAND COVER (IDEAM, 2010), para el proceso de identificación de coberturas y validación en la matriz de confusión.

Tabla 3. Afectación por incendios sobre las unidades del paisaje, región Orinoquia.

Unidad del paisaje (UP)	Área total (ha)	Extensión del área quemada (ha)	Porcentaje de área quemada (%)
Sabana de piedemonte	2047833,9	19673,0	4,6
Altillanura	9285185,9	350307,7	81,2
Sabanas inundables	6635043,6	61426,9	14,2
Total	17968063,4	431407,7	100,0

Fuente: Anaya, 2009.

5.2.3 Software

La adecuación de la información y el procesamiento se realizaron por medio de la utilización del software ArcGis 10, Envi 5 y para la validación hojas de Excel.

Las correcciones radiométricas, procesamiento de las imágenes y la clasificación se llevaron a cabo con el software ENVI 5, posterior a esto se realizó el análisis de resultados (histogramas, cruce de tablas, entre otros) y salidas gráficas con ArcGis 10, y finalizando se utilizan las hojas de Excel para la validación de datos obtenidos del proceso de clasificación calculando la matriz de confusión y el índice Kappa.

5.3 MÉTODOS

Para el desarrollo de la metodología se analizó el área afectada por el incendio producido el 14 de septiembre de 1997. Por tal motivo, a medida del desarrollo metodológico, se seleccionará un sector de la imagen Landsat 5, Path - Row 006-055 del 17 de septiembre de 1997 (imagen más próxima al día en que se registra el accidente en condiciones

idóneas para el procesamiento digital) y el sector de la imagen pre-incendio del 30 de septiembre de 1996.

Preprocesamiento

Para el desarrollo metodológico se seleccionó un par de imágenes Landsat teniendo en cuenta la fecha del incendio por derrame de crudo y que cumpliera con condiciones idóneas (nubosidad) para su procesamiento.

Esta etapa consiste en el alistamiento de los datos crudos, en donde se les realizan correcciones de tipo geométrico, radiométrico y conversión de ND a valores de reflectancia.

Tales correcciones irán encaminadas a la transformación de coordenadas, a eliminar las distorsiones captadas por el sensor asociadas a condiciones atmosféricas y de iluminación.

5.3.1 Imágenes Landsat

Para la estimación de las coberturas afectadas por quema de crudo en el municipio de Arauquita, se obtienen del visualizador Glovis el par de imágenes con las siguientes características, descritas en la Tabla 4 e ilustradas en la Figura 10.

Tabla 4. Información de imágenes

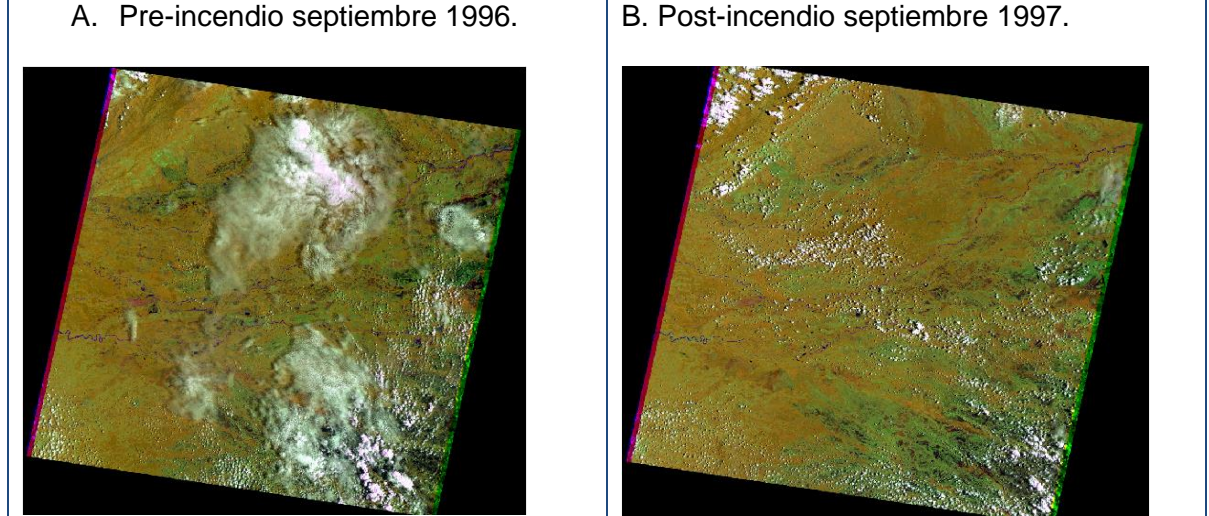
Id archivo	Path	Row	Año	Mes	Día	Bandas
L51XXX1096274140100	006	055	1996	09	30	7
L51XXX1097260140100	006	055	1997	09	17	7

Los datos técnicos del satélite se relacionan en la Tabla 5, en la que se destacan el sensor utilizado, el número y la banda correspondiente, el rango de la longitud espectral de cada banda y las resoluciones espacial, temporal y radiométrica.

Tabla 5. Características de Landsat 5

Sensor	Banda		Resolución Espectral (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal	Resolución Radiométrica
TM	1	Azul	0,45 – 0,52	30	16 días	8 bits
	2	Verde	0,52 – 0,60	30		
	3	Roja	0,63 – 0,69	30		
	4	Infrarrojo cercano	0,76 – 0,90	30		
	5	Infrarrojo cercano2	1,55 – 1,75	30		
	6	Termal	10,4 – 12,5	120		
	7	Infrarrojo medio	2,08 – 2,35	30		

Figura 10. Escenas seleccionadas zona de estudio en combinación 453.



5.3.1.1 Delimitación de la zona de estudio

Se realizó inicialmente a partir del límite municipal de Arauquita Figura 11 a escala 1:600.000, para la primera parte de procesamiento y finalmente en el proceso de clasificación la zona es delimitada por una ventana de salida a escala 1:250.000.

5.3.1.2 Correcciones radiométricas

Las correcciones que se deben realizar sobre las imágenes tienden a eliminar los ruidos causados por la señal que llega del satélite luego de haber atravesado la atmosfera, el efecto de la distorsión en los ND de los pixeles, pueden presentar alteraciones radiométricas de forma que no coincidan con el tono, y tamaño de los objetos (Chuvieco, 1996).

Para este caso las imágenes descargadas no serán sometidas a la corrección de efectos atmosféricos; debido a que, después de realizado el recorte de la zona y bordes negros (posibles valores iguales a cero), e intentar emplear el método de corrección del histograma por sus valores mínimos (Chávez, 1996), se observa en la información de las imágenes que el comportamiento de los ND en el histograma de ambas ha sido corregido (USGS) y se halla valores de 0 a 255.

Por lo tanto sólo se le aplicarán en la etapa de pre-procesamiento la calibración de los ND a ambas imágenes, para ser convertidos en valores de reflectancia y obtener una representación más óptima de las variables biofísicas de la zona de estudio.

5.3.1.3 Transformación de ND a valores de radiancia (L_{λ})

La calibración radiométrica de ND a parámetros físicos se realiza a partir de la Ecuación (11) según Chander et al., 2009.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal\ min}) + LMIN_{\lambda} \quad (11)$$

Donde:

L_λ Es el valor de la celda como radiancia espectral
 Q_{cal} = Valor del pixel es el número digital ND
 $Q_{cal\ min}$ = Valor mínimo del pixel calibrado correspondiente a $LMIN_\lambda$ ND
 $Q_{cal\ max}$ = Valor máximo del pixel calibrado correspondiente a $LMAX_\lambda$ ND
 $LMIN_\lambda$ = Radiancia espectral de la banda que se escala a $Q_{cal\ min}$ [W/(m² sr μm)]
 $LMAX_\lambda$ = Radiancia espectral de la banda que se escala a $Q_{cal\ max}$ [W/(m² sr μm)]
 Los datos de $LMAX_\lambda$, $LMIN_\lambda$, $Q_{cal\ min}$ y $Q_{cal\ max}$ fueron tomados del metadato de cada imagen.

5.3.1.4 Transformación radiancia a valores de reflectancia (ρ)

Para pasar los valores de radiancia a reflectancia es necesario relacionar los valores de radiancia (los ND pixeles) con la radiancia con la que el objeto es iluminado, aplicando la Ecuación (12), que calcula la reflectancia de la parte superior de la atmosfera (TOA), tomando en consideración solo la distancia al sol y la geometría de la radiación solar incidente (Chander et al., 2009).

$$\rho_\lambda = \left(\frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos \theta_s} \right) \quad (12)$$

Donde:

π = Reflectancia planetaria en el tope de la atmosfera igual a ~ 3.14159.
 L_λ = Es el valor de la celda como radiancia espectral [W/(m² sr μm)]
 d = Distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas)
 $ESUN_\lambda$ = Medida irradiancia solar exoatmosférica o constante solar [W/(m² μm)]
 θ_s = Ángulo cenital solar [grados]

Para saber la medida del día juliano es necesario conocer la fecha de adquisición de la imagen, y de esta manera este corresponderá a la suma de los días transcurridos desde el inicio del año hasta el día de adquisición. El cálculo de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas se realiza con la Ecuación (13).

$$d = 1 - 0,0167 * \cos \left(\frac{2\pi (\text{Día Juliano} - 3)}{365} \right)^2 \quad (13)$$

La medida de la irradiancia solar exoatmosférica se extrae de (Chander et al., 2009) y se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6: Constante solar o irradiancia solar exoatmosférica $ESUN_{\lambda}$ [W/(m² μm)]

LANDSAT 5	
1	1983
2	1796
3	1540
4	1031
5	220,0
7	83,44

Fuente: Chander et al., 2009.

El ángulo cenital solar se obtiene considerando el ángulo de elevación solar como se indica en la Ecuación (14)

$$\Phi = 90 - \theta_s \quad (14)$$

Donde:

θ_s = Ángulo cenital solar [grados]

Para el cálculo de reflectancia en la Ecuación (12) es necesario conocer los valores de fecha adquisición de las imágenes, el ángulo cenital solar, $LMAX_{\lambda}$, $LMIN_{\lambda}$, $Q_{cal \min}$ y $Q_{cal \max}$ los cuales se encuentran consignados en los metadatos de las imágenes.

Con las imágenes transformadas a valores de radiancia se procedió a aplicar la Ecuación (12), para esto los valores de distancia solar (d) de la imagen pre-incendio fue de 1,0011941, el ángulo azimutal (Φ) de 35,12789348, y el día juliano corresponde a 274. Para la imagen pos-incendio los valores de distancia solar (d) fue de 1,0051219, el ángulo azimutal (Φ) de 35,12789348, y el día juliano correspondiente es 260.

5.3.2 Procesamiento

Para el desarrollo de la propuesta metodológica la cual busca delimitar el área de afectación tras el incendio ocasionado por la quema de crudo, se aplican tres índices de vegetación para analizar el tipo de coberturas presentes en esta y 2 de áreas quemadas basados en la reflectancia del infrarrojo cercano, medio y rojo en dos imágenes pre y post-incendio.

5.3.2.1 Índices de vegetación

Para la delimitación del área quemada se aplicaron los tres índices de vegetación los cuales permiten realizar una caracterización y valoración cualitativa del estado de las coberturas vegetales a partir de la comparación visual del comportamiento espectral.

✓ NDVI

El índice fue calculado para obtener una nueva imagen donde se resaltaran los pixeles de interés relacionados con las coberturas vegetales, posibilitando detectar, estimar y comparar los cambios de la vegetación en su distribución y superficie ocupada, mediante la Ecuación (1).

El rango de valores de las reflectancias espectrales se encuentra entre el 0 y el 1; ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. Por consecuencia de estos rangos de valores, el NDVI varía su valor entre -1 (para zonas con ausencia de vegetación) y 1 (para zonas con alta actividad fotosintética), deduciendo entonces que valores próximos a 0,5 serán considerados como vegetación sana y densa (Gilabert et al., 1997).

✓ **SAVI**

El objetivo de la aplicación del índice es identificar y diferenciar los suelos desnudos y con cobertura vegetal; puesto que, el índice elimina la influencia que el suelo puede tener sobre las reflectividades en el rojo y en el infrarrojo que puedan enmascarar las de la vegetación por medio de la Ecuación (2), la cual está dada en función del NDVI agregándole un factor de ajuste (L), que se determina según la densidad de la vegetación que se presenta en el área de estudio, para este caso se ha asignado 0,5 que corresponde a un nivel intermedio (Huete, 1988). La variación de su valor resultante oscilará entre -1 y 1, como se indica en la Figura 16.

✓ **GEMI**

Este índice se utiliza por que proporciona una alta separabilidad de firmas espectrales y precisión en la estimación de áreas quemadas ya que reduce simultáneamente el efecto atmosférico y las afecciones por el suelo (Pinty y Verstraete, 1992), aplicando la Ecuación (3) los resultados estarán distribuidos dentro del rango de -1 a 1.

✓ **Detección de cambios**

Para llevar a cabo la comparación y definir el índice de vegetación más óptimo para el estudio se aplicó una técnica cuantitativa de detección de cambios, llamada diferencia entre imágenes (Ruiz et al., 2005).

Consiste en la resta entre imágenes de dos fechas previamente homogenizadas radiométricamente, para discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, mientras que las que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos).

Como resultado de este cálculo se obtiene una imagen de cambios, que presentará tonos oscuros para las zonas que hayan reducido sus ND, tono más claro para aquellos que hayan ganado y los tonos intermedios para las zonas estables. En este caso, el valor de la diferencia nos permite señalar las zonas que han perdido o ganado vigor vegetal (Viedma y Chuvieco 1994; Coppin y Bauer, 1994). El histograma de esa imagen de cambios suele revelar un perfil gaussiano, con las máximas frecuencias para las zonas estables (en el centro del histograma) y las dinámicas ocupando las colas de la distribución.

El índice de vegetación óptimo será el que sea capaz de definir los rasgos de cada cobertura y mostrar las variaciones en el periodo de tiempo definido (Padilla, 2005).

5.3.2.2 Índices de área quemada

Los siguientes índices consistirán en la aplicación de las Ecuaciones (5) y (6) que permiten maximizar la separabilidad de la cubierta de interés y el resto de las cubiertas de las imágenes.

✓ NBR

El propósito de la aplicación del índice es aclarar la confusión que se establece entre las áreas quemadas, espejos de agua y las sombras de las nubes. Este índice destaca el área recorrida por el fuego respecto a la zona no afectada e identifica los distintos niveles de daño que ha sufrido la vegetación a causa del incendio, su cálculo se realizó aplicando la Ecuación (5) y como resultado arrojará la definición del perímetro afectado por la quema (Key y Benson 2004).

✓ BAI

El propósito de la aplicación de este índice es discriminar el área afectada por el fuego. Ya que tiene una gran sensibilidad a la presencia de carbón y cenizas en el suelo de las áreas recientemente quemadas. Se calcula por medio de las constantes definidas del centro de convergencia, la banda roja e infrarrojo cercano, por medio de la Ecuación (6) (Bastarrika et al., 2011).

✓ Expansión Lineal del Contraste

Se aplica con la finalidad de ajustar el rango de ND de la imagen y una mayor capacidad de nivel visual (NV) del ordenador.

Para esto se crea un Colour Look up Table (CLUT) en la que el ND mínimo y máximo de la imagen asociados un NV de 0 y 255 respectivamente, distribuyendo linealmente el resto entre estos dos límites. Las imágenes luego de este proceso aparecen más contrastadas y los histogramas presentan una mejor distribución. Las colas del histogramas se han fijado en los extremos del rango y los valores intermedios están mejor repartidos en la escala (Rejas J, 2008).

5.3.3 Clasificación

En esta etapa se realizará la representación gráfica del producto final, comprendido en las 11 coberturas: arbustales, arenales, bosques, casco urbano, cultivos, pastos, pastos arbolados, ríos, vegetación secundaria, vías y zonas pantanosas; determinadas en la zona de estudio, a partir de la identificación en la cartografía coberturas de la tierra 2000 IGAC, metodología CORINE Land Cover (IDEAM, 2010) adaptada para Colombia.

Se establece aplicar una clasificación no supervisada inicialmente con el software ENVI 5.0 y una clasificación supervisada de máxima verosimilitud con el propósito de realizar el análisis comparativo cualitativo y cuantitativo que permitan diferenciar los rasgos y las diferencias espectrales contenidos en la ventana de interés.

Para lo cual el algoritmo de agrupación de píxeles adyacentes del software ENVI es eficaz. ENVI dispone también del algoritmo “Edge-Based”, que tiene en cuenta los bordes

o límites, píxel por píxel, agrupando aquellos fragmentos (algoritmo Full Lambda-Schedule) con características de color, brillo, tonalidades y textura, de acuerdo a su vecino más cercano. (BLASCHKE, 2010; LI et al., 2009; LUCAS et al., 2007; SANTOS, 2007; HAY et al., 2005). Por lo tanto es fiable, como lo demuestra su validación e intervalo de confianza calculado en el índice Kappa en el producto final.

Seguidamente se realiza la clasificación supervisada ejecutada en el software Erdas Imagine 9.2 a las bandas (3,4 5) definidas por medio del índice de factor óptimo más la banda del índice de vegetación en el mejor resultados se obtuvieron, en este caso el SAVI.

La fiabilidad del método se comprueba en la relación de reportes de índice kappa y matriz de confusión para el análisis comparativo en el capítulo de resultados y discusión.

5.3.4 Validación

Se construye las matrices de confusión, para obtener los errores de omisión, comisión, exactitud global, exactitud del usuario y exactitud del producto, como también el cálculo del coeficiente kappa para determinar la concordancia y similitud entre el proceso de clasificaciones y la cartografía coberturas de la tierra IGAC 2000, ambas en formato raster.

6. RESULTADOS

Culminado el proceso metodológico se da paso a la exposición de los resultados donde se encuentra contenido el análisis de la respuesta espectral de los índices que permitirá la determinación-caracterización temática de la distribución espacial del área y la cuantificación de las coberturas afectadas por la propagación del accidente.

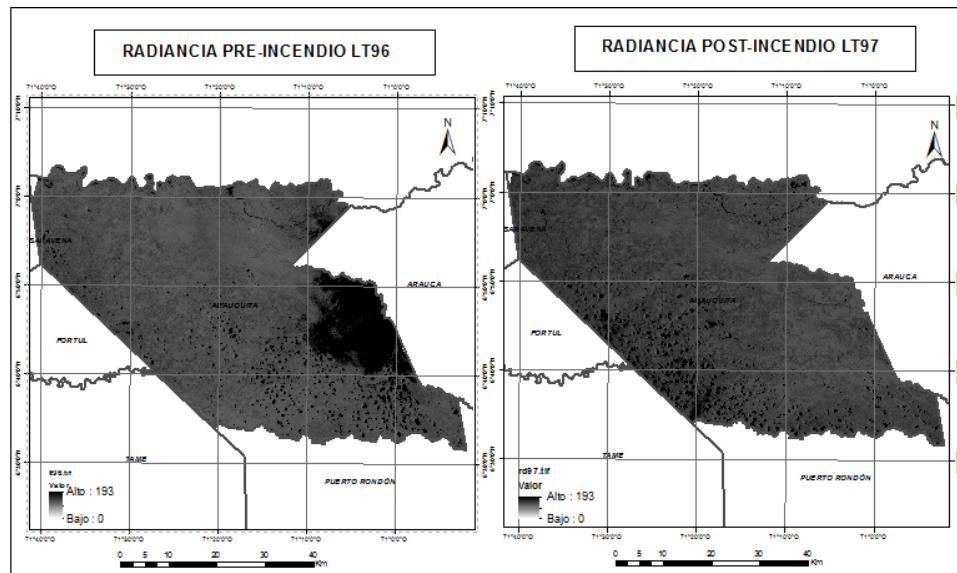
6.1 Pre-procesamiento

Las imágenes Landsat TM utilizadas en el estudio se le realizaron correcciones radiométricas para convertir los valores ND en valores de radiancia y reflectancia.

6.1.1 Radiancia

Se convirtieron los valores de ND a parámetros físicos para las imágenes pre-incendio y post-incendio utilizando la Ecuación 11. El análisis del resultado de salida indica en la barra de graduación de color, parte inferior de la imagen que el rango de los valores de radiancia mínimos para la imagen de pre-incendio y post-incendio va desde un mínimo de 0 hasta un máximo de 193, se puede apreciar en la Figura 12 que para las dos imágenes ilustradas a escala 1:600.000 los valores más altos corresponden a las zonas con nubosidad, los valores más bajos a vegetación densa, como bosques y áreas naturales y los valores intermedios a áreas transformadas.

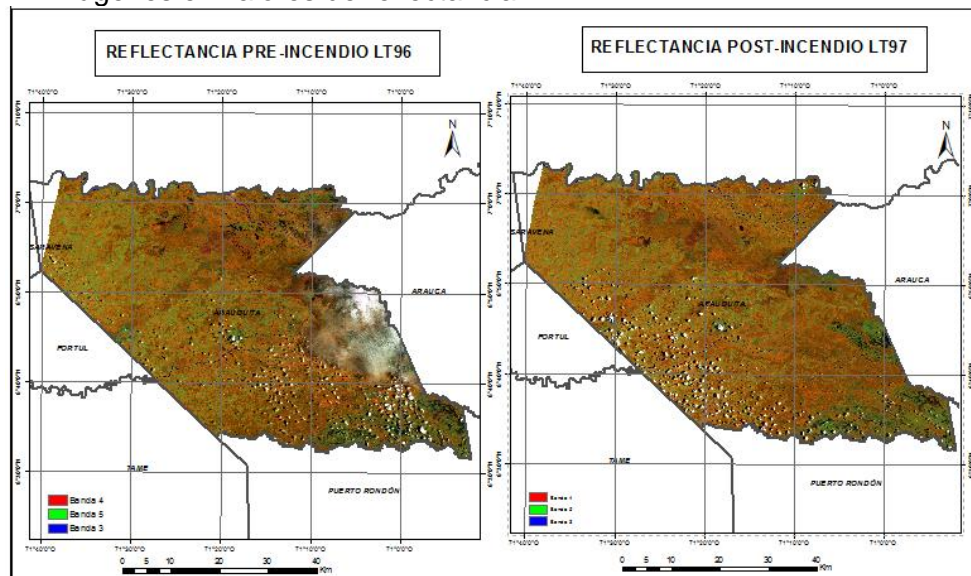
Figura 11: Banda espectral de las imágenes de radiancia pre-incendio y post-incendio



6.1.2 Reflectancia

En la Figura 12 se presentan las imágenes a escala 1:600.000 en una combinación de falso color 453, lo que permite hacer una diferenciación entre las áreas de vegetación densa en tonos rojizos (banda 4 en el canal del rojo), en los tonos del verde aquellas áreas que poseen escasa vegetación o vegetación herbácea (banda 5 en el canal verde) y las zonas con alto contenido de humedad correspondientes a zonas pantanosas - vegetación hidrófila (banda 3 en el canal del azul) según las descripciones mostradas en la cartografía coberturas de la tierra IGAC 2000.

Figura 12: Imágenes en valores de reflectancia.



6.2 Procesamiento

Se obtienen finalmente los resultados y análisis de los datos relevantes arrojados por los índices de vegetación e índice de quema que llevarán a cumplir los objetivos propuestos en el estudio.

6.2.1 Índices de vegetación

Se obtuvo para las imágenes del estudio los índices de vegetación (NDVI, SAVI, GEMI) para determinar de manera cuantitativa el vigor vegetal y de esa manera se analizó el comportamiento de cada imagen a escala 1:600.000, también se realizó la diferencia a cada salida o par de imágenes (pre-incendio y post-incendio).

La resta entre las imágenes de dos fechas, previamente homogenizadas radiométrica y geométricamente, permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, mientras que las que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos).

Como resultado de este cálculo se obtiene una imagen de cambios, que presentará tonos oscuros para las zonas que hayan reducido sus ND, los más claros para aquellos que hayan ganado y los intermedios para las zonas estables. En este caso, el valor de la diferencia permite señalar las zonas que han perdido o ganado vigor vegetal, mostrados en la Figura 20 (Viedma et al., 1993; Coppin y Bauer, 1994).

Para el análisis de los resultados de los índices de vegetación se realiza la adecuación de lo ND aplicando la expansión lineal del histograma (redimensiona los valores en el rango de 0 a 255).

6.2.1.1 NDVI

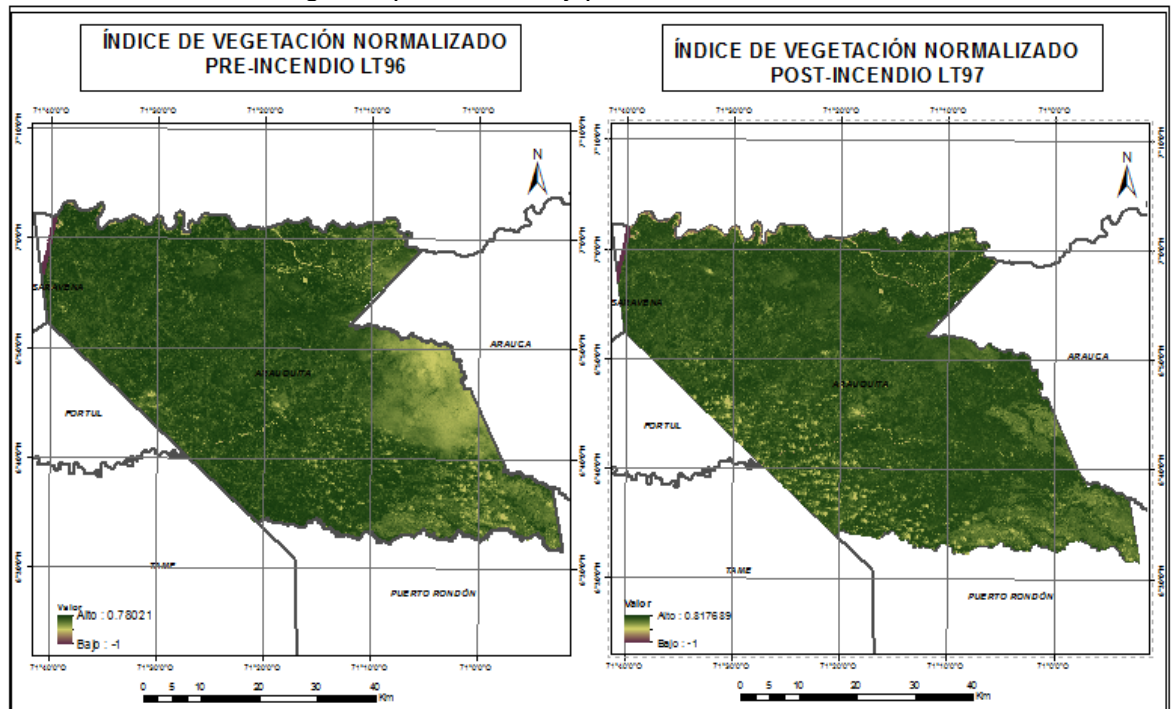
La reflectividad diferencial de las bandas roja e infrarroja (IR) permitió identificar y diferenciar las variaciones. El resultado para las dos imágenes corresponde a un índice no dimensionado, donde sus valores van de -1 a 0,79 como se observa en la Figura 13.

Los valores en el histograma clasificados en cinco rangos representativos, Figura 14 clasificados en el rango de 0 a 60 corresponden a las nubes y cuerpos de agua; los valores entre 60 y 100 corresponden a rocas o terreno desnudo y arenas; los valores que oscilan entre de 100 y 140 a terrenos con pastos, mientras que los valores moderados que están en el rango de 140 a 180 representan áreas de arbustales y herbazales, los valores altos (180 a 255) indican las áreas con bosques inundables, bosques de ribera, zonas pantanosas, vegetación asociada a suelos con altos contenido de humedad (López P, 2012).

Se puede observar en la Figura 13, los valores altos de NDVI (color verde oscuro), indican que esta zona por su condición fisiográfica indican que son sabanas inundables, la mayor parte del año mantiene sus suelos con un nivel freático alto en zonas pantanosas, lo que permite la presencia de vegetación halófila, bosque inundables, y bosques de ribera (Romero-Ruiz et al., 2004).

El índice NDVI aplicado en la imagen pos-incendio LT97, proporciona una buena discriminación entre las coberturas vegetales con alta actividad fotosintética⁴ y alteradas - degradadas⁵; por lo tanto las coberturas alteradas son aquellas que oscilan en el rango de 0 a 140, aunque en este mismo rango se confunde ciertas zonas que son suelos desnudos, ríos, arenales y nubes.

Figura 13. NDVI en las imágenes pre-incendio y post-incendio

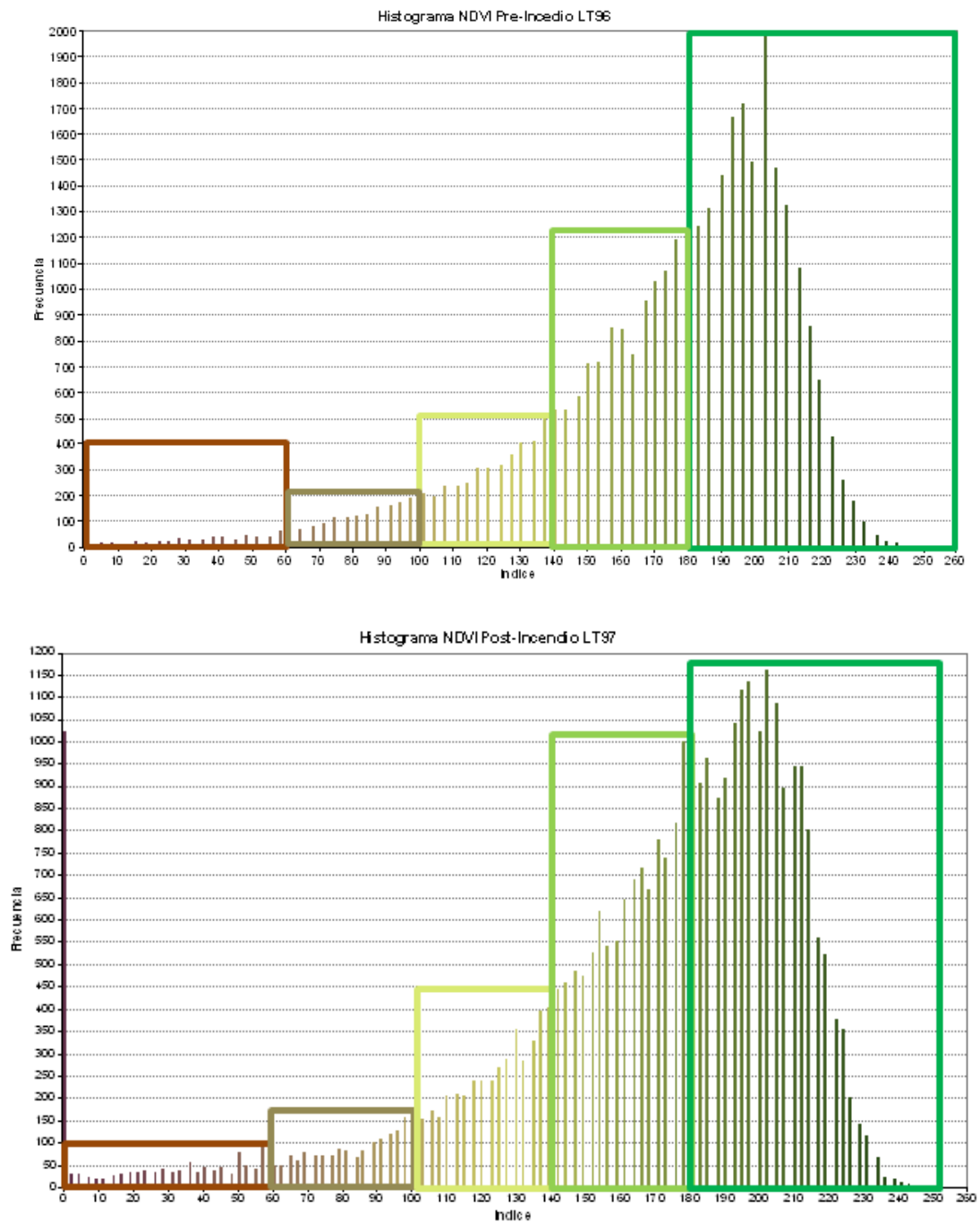


- 0 - 60: Nubes y cuerpos de agua
- 60 - 100: Arenaes, roca y terreno desnudo
- 100 - 140: Pastos
- 140 - 180: Arbustales y herbazales
- 180 - 255: busques inundables, de ribera y zonas pantanosas.

⁴ Se refiere al máximo crecimiento celular; llegada la etapa lineal de crecimiento la concentración de pigmentos aumenta significativamente, permitiendo la rápida acumulación de oxígeno.

⁵ Disminución progresiva de las características de vigor y salud en la vegetación.

Figura 14. Histogramas de las imágenes NDVI pre y post-incendio



El cálculo del SAVI se obtiene aplicando la Ecuación (2). Los resultados del índice presentados en la imagen LT97 post incendio de la Figura 16 son óptimos ya que el factor ($L=0,5$) que ajusta la línea de vegetación al suelo, permite diferenciar

perfectamente cada cobertura según la graduación de color y sus patrones espaciales de distribución.

Figura 15. SAVI en las imágenes pre-incendio y post-incendio

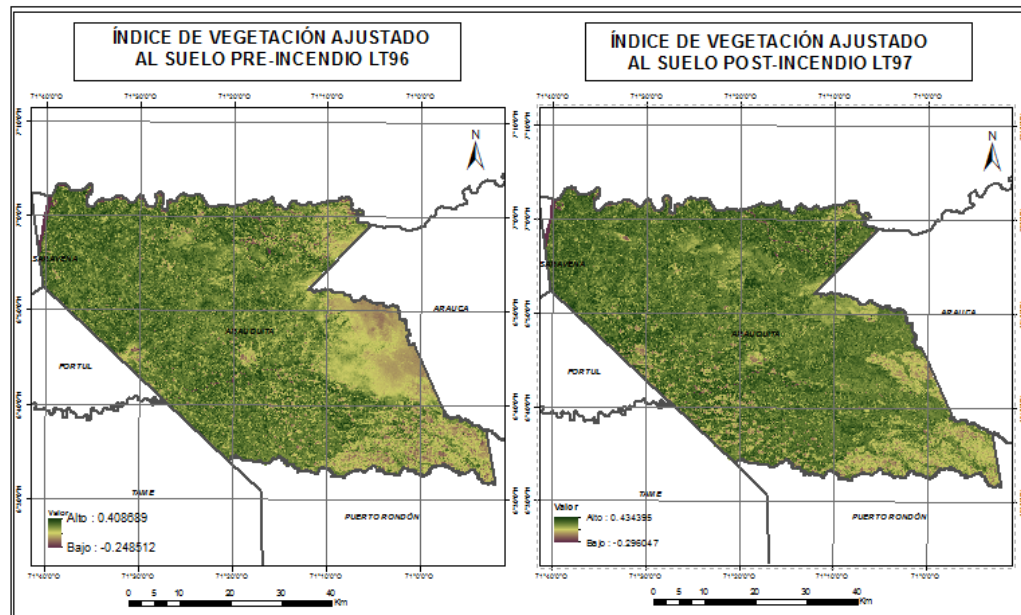
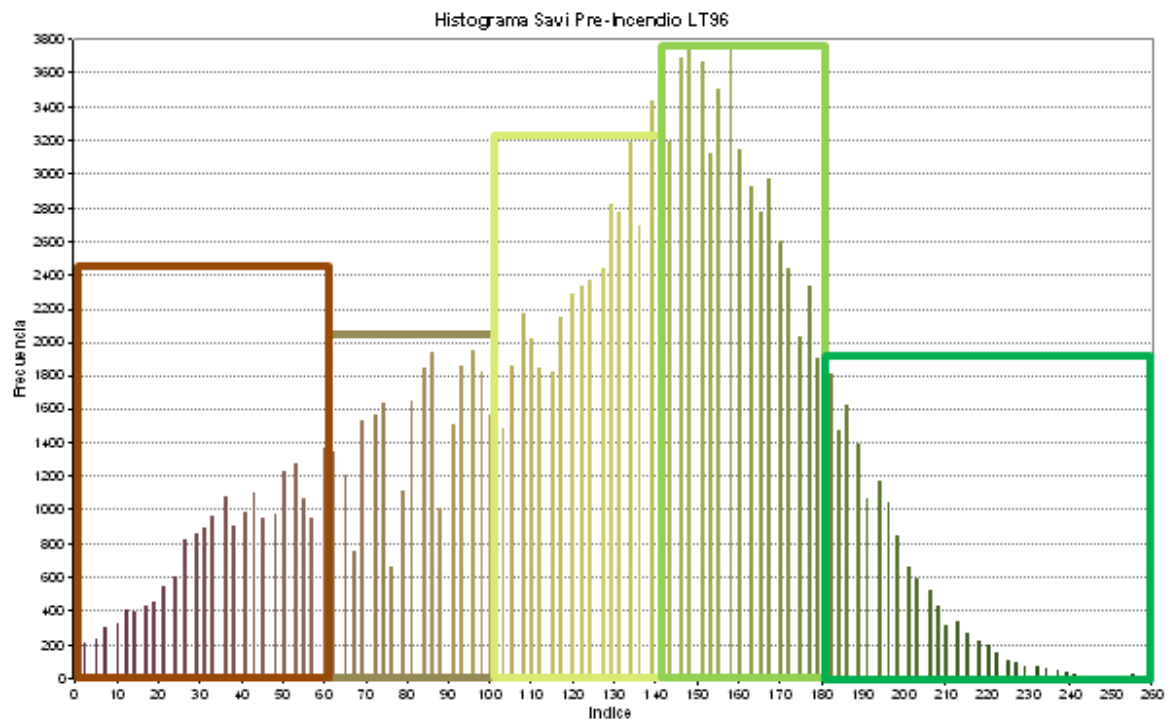
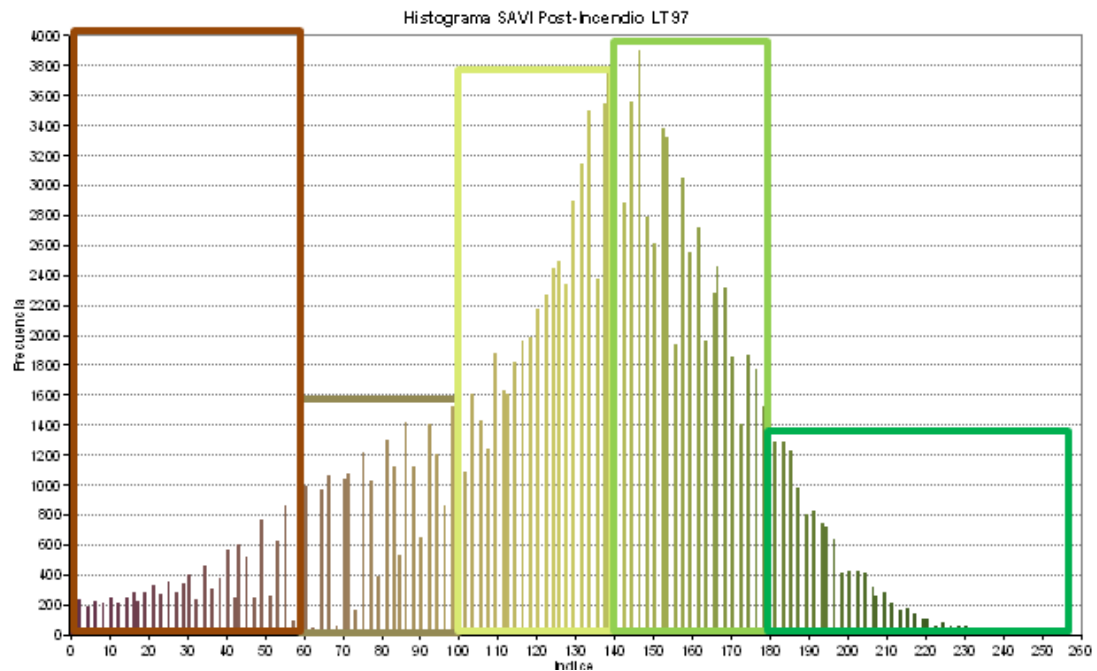


Figura 16. Histogramas de las imágenes SAVI pre y post-incendio





- 0 - 60: Nubes y cuerpos de agua
- 60 - 100: Arenales, roca y terreno desnudo
- 100 - 140: Pastos
- 140 - 180: Arbustales y herbazales
- 180 - 255: busques inundables, de ribera y zonas pantanosas.

6.2.1.2GEMI

Se calculó utilizando la Ecuación (3), donde los resultados obtenidos se observa que existe una baja diferenciación en las áreas de suelos desnudos como son los arenales; ya que el índice para este tipo de coberturas no genera buenos resultados, anulándose. En el caso de las cubiertas de nubes y cuerpos agua, el índice supera el rango indicado, debido a los valores altos de reflectancia en la banda roja y producen valores negativos para estas coberturas ilustrados en la Figura 17 y detallados en los valores del histograma en la Figura 18.

Figura 17: GEMI en las imágenes pre-incendio y post-incendio.

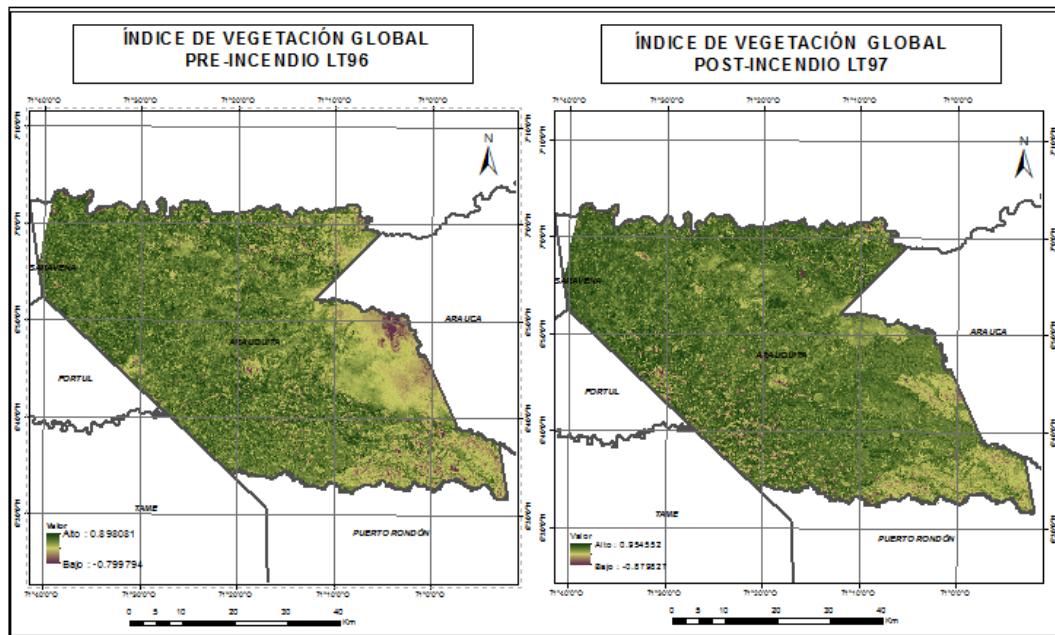
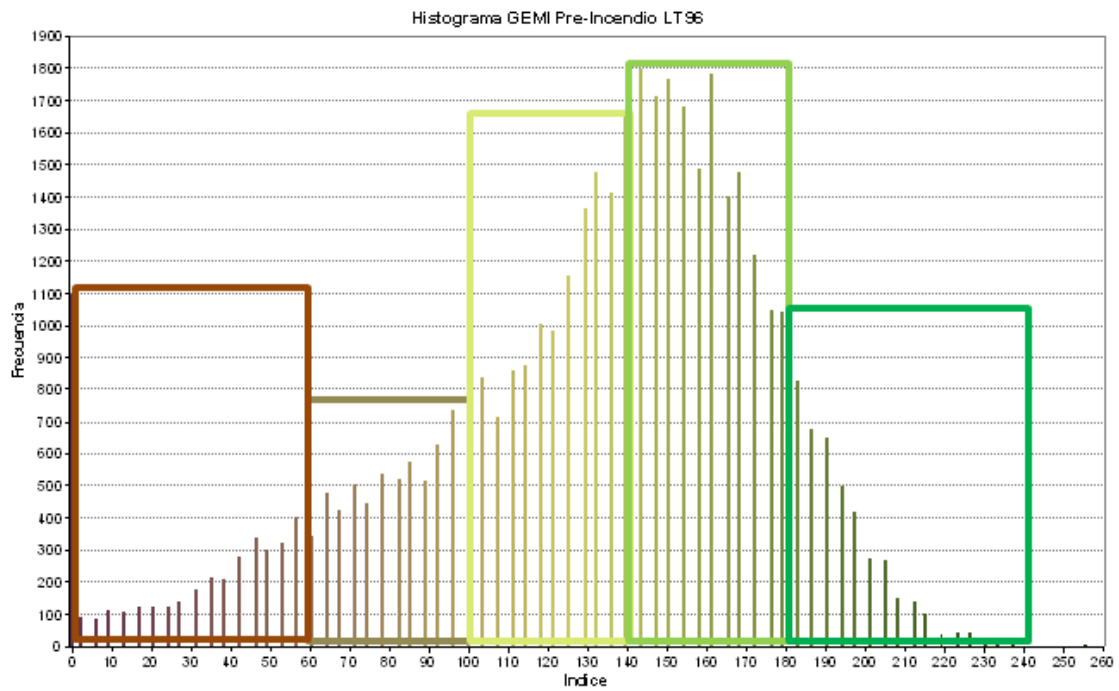
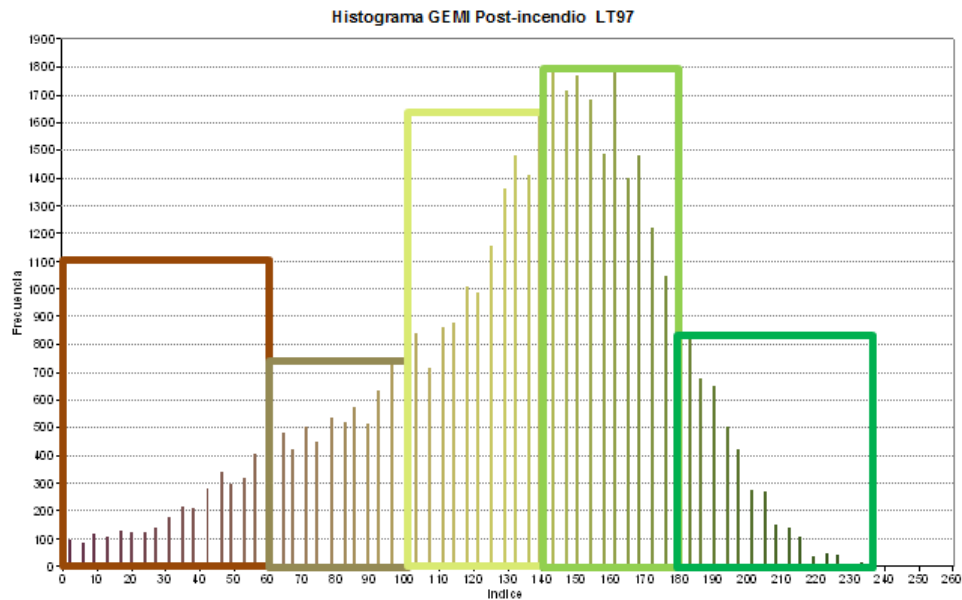


Figura 18. Histogramas de las imágenes GEMI pre-incendio y post-incendio





- 0 - 60: Nubes y cuerpos de agua
- 60 - 100: Arenales, roca y terreno desnudo
- 100 - 140: Pastos
- 140 - 180: Arbustales y herbazales
- 180 - 255: busques inundables, de ribera y zonas pantanosas.

6.2.1.3 Diferencia de los índices de vegetación

A partir del análisis multitemporal con los índices de vegetación se delimita una ventana de interés correspondiente a la zona donde se presentan variaciones en el estado de las coberturas por intervenciones antrópicas en impactos ambientales directos e indirectos por la presencia de la infraestructura petrolera Caño Limón-Coveñas en el ecosistema y por la alta demanda y actividad (Cusarí, 1997).

La resta de los índices ilustrada en la Figura 19 pre y post incendio homogeniza los valores que conservan el mismo comportamiento en ambas imágenes, aunque cumple con el objetivo principal de esta operación que es resaltar las diferencias significativas que existen entre las dos fechas de la toma (Padilla, 2005).

En general la resta de los índices presentó el mismo comportamiento en los valores espectrales de suelo desnudo y poca actividad fotosintética, en este caso el área afectada, le corresponde los valores más altos en el rango más alto del NDVI y SAVI, debido a la respuesta espectral del carbón y cenizas del área recientemente quemada, a diferencia del índice GEMI que asocia los valores menores de reflectancia a las coberturas con escasa vegetación y baja actividad fotosintética.

Se revisó la distribución de los valores para cada imagen utilizando la expansión lineal del histograma de frecuencia Figura 21.

Figura 19: Diferencias de los índices de vegetación para la ventana de interés.

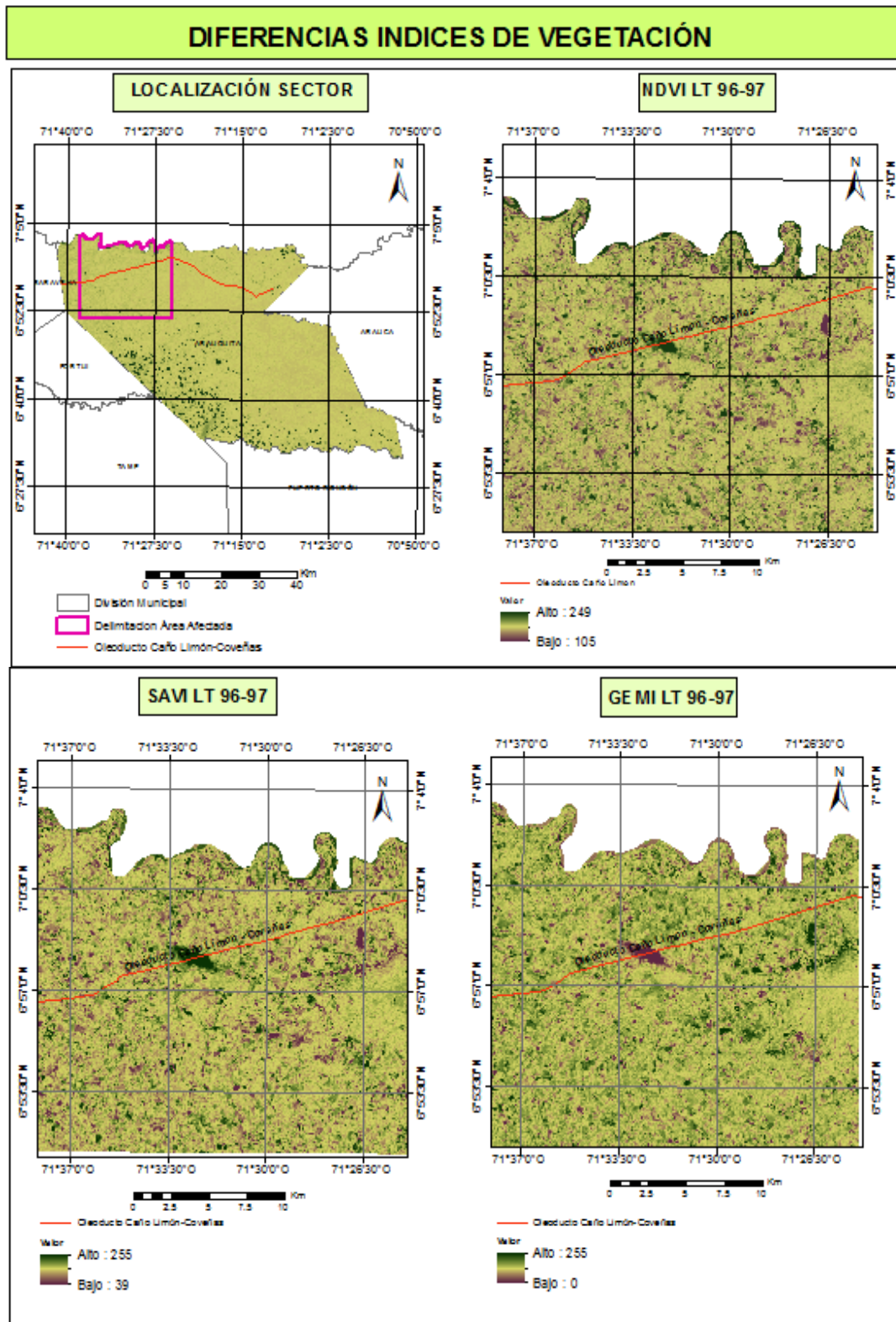
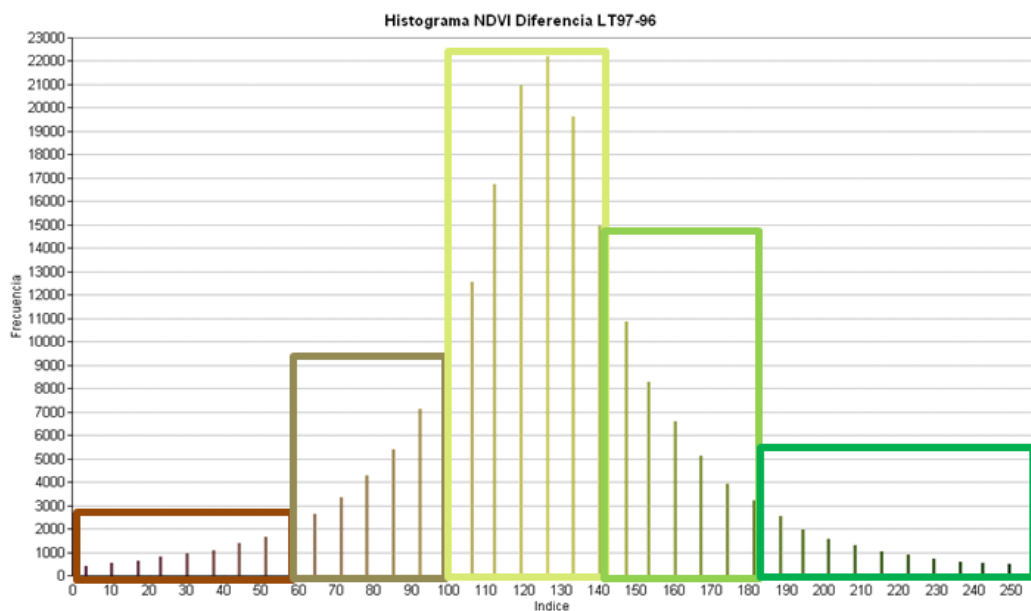
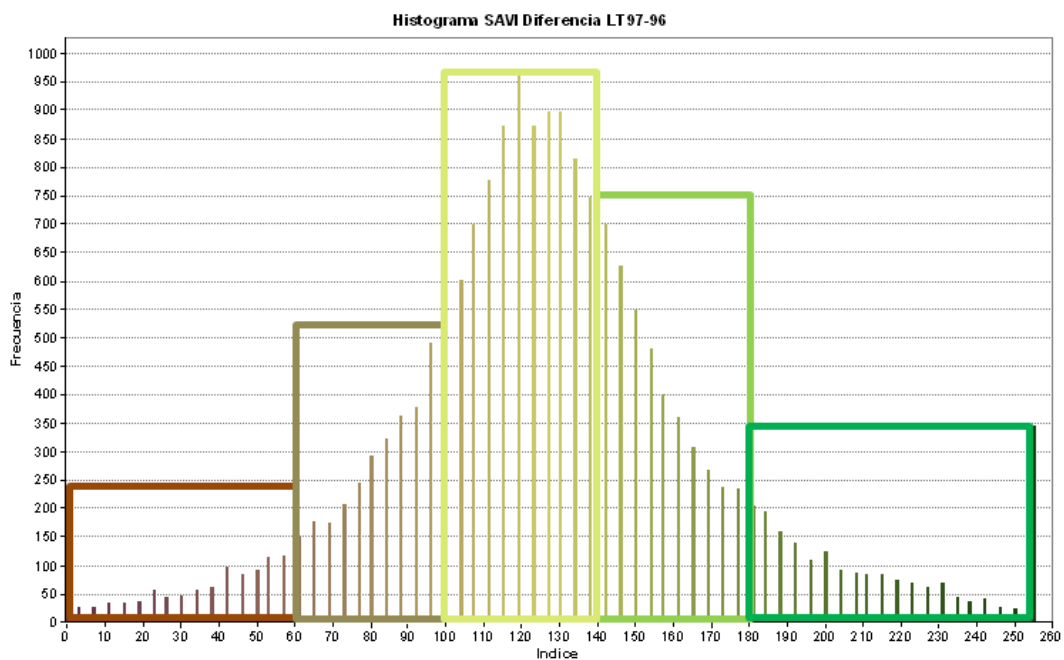


Figura 20: Histogramas pre y post-incendio de índices de de vegetación: a.NDVI, b.SAVI, c.GEMI.

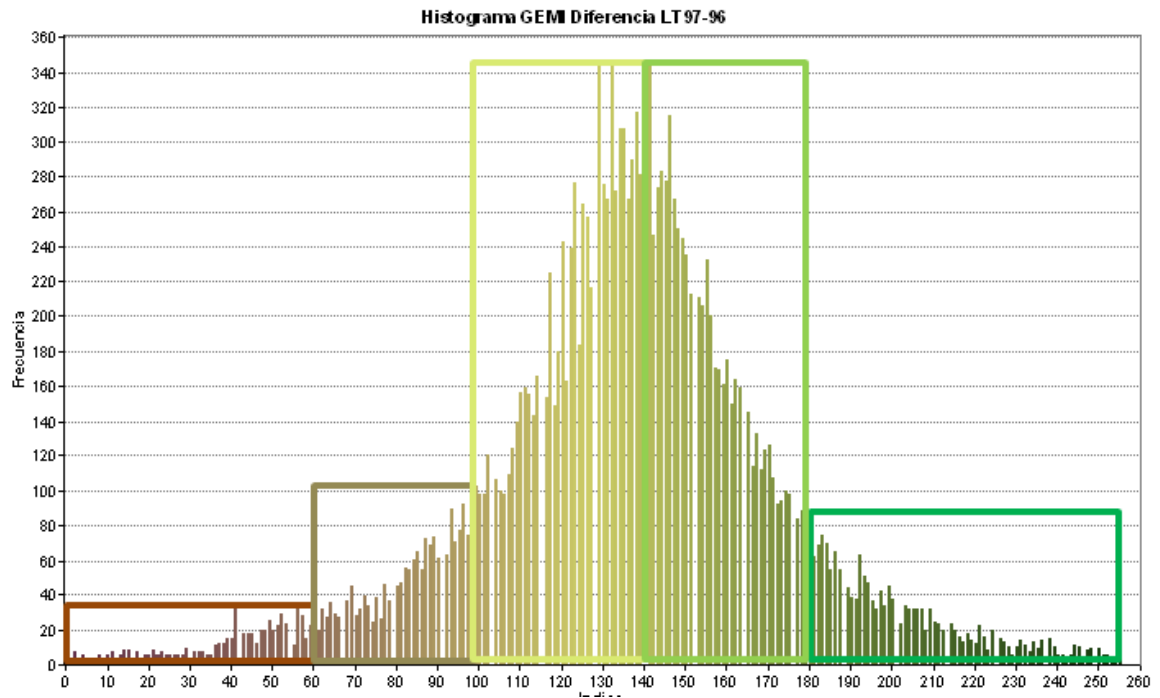
a)



b)



c).



- 0 - 60: Nubes y cuerpos de agua
- 60 - 100: Arenales, roca y terreno desnudo
- 100 - 140: Pastos
- 140 - 180: Arbustales y herbazales
- 180 - 255: busques inundables, de ribera y zonas pantanosas.

a) Indica que hay una alta concentración de los valores en el rango de 0 y 60, con tendencia a valores negativos, esto genera que haya una baja discriminación y un mínimo resalto tanto de las coberturas como del área que presenta cambios en la vegetación.

b) Mostró la mayor concentración de los valores en un rango de 70 a 140, pero la tendencia estos es a distribuirse hacia el eje positivo, lo que permite discriminar aquellas coberturas con una alta frecuencia espectral, como el suelo desnudo, el agua y en la ventana de estudio que presenta cambios significativos.

c) Al igual que en los dos histogramas anteriores, la mayor concentración de valores tiende a moverse en el rango de 100 a 150, pero hay una mejor distribución del histograma del valor mínimo y el máximo.

De esta manera se llega a la conclusión que el índice que presentó mayor favorabilidad fue la resta del SAVI, pues permitió discriminar mejor las áreas con un nivel de afectación.

6.2.2 Índices de quema

Se calcularon los índices de área quemada BAI y NBR con la Ecuación (5) y (6), en la Figura 22, se observa la reducción y la transformación de la cubierta vegetal, producto del incendio; como también un comportamiento que tiende a presentar una alta reflectividad en las bandas del visible, infrarrojo cercano y medio, similares tanto en el área quemada como en las coberturas con altos contenidos de humedad, focalizados en un sector del municipio, definido en la ventana de interés extraída a escala 1:250.000.

6.2.2.1 Cálculo del cociente de quema normalizado (NBR)

Aunque hace una excelente discriminación de las coberturas con valores altos de reflectancia, tras la aplicación de la Ecuación (5), no arroja buenos resultados puesto que enmascara el área quemada con cuerpos de agua, suelos saturados en humedad y vegetación hidrófita, de tal manera que no determina claramente el área de quema como se observa en la Figura 21.

Para el análisis de las cubiertas (suelos saturados en humedad y área afectada, vegetación: pasto, arbustales, bosques y casco urbano, vías, cubiertas de agua) discriminadas por el índice se realiza una clasificación Isodata por medio del algoritmo disponible en ENVI 5.0 y relacionadas en la Tabla 7.

En la Tabla 7 se encuentra el análisis del NBR discriminado sólo en 3 tres clases, debido a que presenta enmascaramiento.

Tabla 7. Área de las clases discriminadas con el índice NBR

CLASES		
SUELOS SATURADOS EN HUMEDAD Y ÁREA AFECTADA (ha)	VEGETACIÓN Pasto Arbustales bosques (ha)	CASCO URBANO, VIAS Y CUBIERTAS DE AGUA (ha)
2866	1779	2406

6.2.2.2 Cálculo del índice de área quemada (BAI)

Este índice de quema calculado con la ecuación 6 presenta resultados óptimos discrimina en valores altos de los cuerpos de agua como también el área afectada apareciendo en tonalidades rojas bien definidas en la Figura 21.

Finalmente por los resultados obtenidos después de la discriminación del sector de interés con los índices de vegetación y aplicación de los índices de quema, se determina que el índice apropiado que llevara a cumplir los objetivos será el BAI, debido a que es el que hace la mejor definición del perímetro afectado, relacionado en la Tabla 8.

Los resultados son obtenidos por medio de la clasificación Isodata utilizando el algoritmo disponible en ENVI 5.0 de la imagen pre incendio en el área de interés y el perímetro de la zona de afectación extraída mediante la clasificación del índice BAI definido en tres clases (área afectada y cuerpos de agua, vegetación: pasto, arbustales, bosques, casco urbano y suelos húmedos).

Se extrae el perímetro del área afectada de la clase con base a la interpretación del comportamiento de forma y textura de señales de carbón y cuerpos de agua que comparten la misma respuesta espectral.

Figura 21. Identificación de áreas asociadas a los índices BAI y NBR

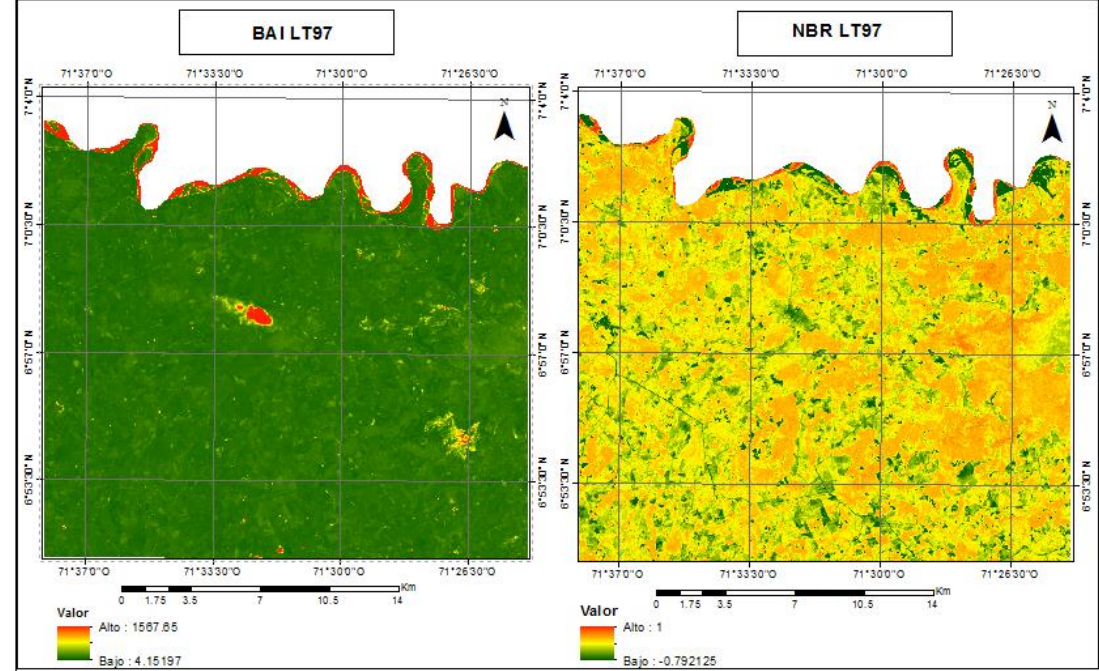


Tabla 8. Resultado de la aplicación del índice BAI

	VENTANA DE INTERÉS	CONSERVO	CAMBIO
Área (ha)	48869,4824	48647,6809	221,8015

6.2.3 Determinación de la afectación de las coberturas por quema de crudo en un sector del municipio de Arauquita.

Para determinar la afectación en las coberturas se generaron tres clasificaciones a escala 1:250.000, dos no supervisada ISODATA utilizando el algoritmo de clasificación del software ENVI v5.0 y una supervisada de máxima verosimilitud (Chuvieco, 2002) con el software Erdas Imagine 9.2.

A la imagen Landsat 96 se le aplica primeramente la clasificación no supervisada en valores de reflectancia compuesta por 6 bandas (excluyendo banda térmica) y luego la clasificación supervisada de máxima verosimilitud a la combinación de bandas de índice de factor óptimo (3,4 y5) más la banda del índice SAVI y no supervisada a la imagen del índice BAI 97, para con esto lograr el perímetro afectado extraído de la imagen BAI clasificada sobre las coberturas clasificadas en la imagen 96.

Seguido del proceso de clasificación en la ventana de interés, se realiza el análisis comparativo de las posibles clases mal clasificadas, en los métodos.

La clasificación de Landsat 96 se determinó 11 clases, según las coberturas presentes por medio de la verificación con la cartografía coberturas de la tierra 2000 IGAC, leyenda Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010); y dos clases (nivel alto y bajo) para la imagen del índice BAI 97 (Blas, M. et al., s,f), las cuales se relacionan en la Figura 22, 23 y 24.

A partir de la clasificación del BAI se generó un raster con dos clases o niveles de severidad⁶ (Ruiz et., al 2005) Alto y Bajo, estimados a partir del análisis de separabilidad espectral que ofreció el índice de área quemada BAI. Posteriormente se incluye en el álgebra de mapas y de esta manera se extrae el área (ha) total de afectación en estas, en valores de porcentaje para ambas clasificaciones de la imagen pre-incendio visualizado en la Tabla 9 y 10.

Figura 22: Clases del mapa identificación del área afectada, leyenda Corine Land Cover (IDEAM, 2010).



A continuación se ilustra en las Figuras 23 y 24, el producto final obtenido por medio del desarrollo metodológico.

⁶ La medida de la severidad de fuego como parámetro relativo indica la cantidad de cambio en relación con las condiciones previas de la vegetación, sin tener en cuenta el tipo de comunidad ecológica, localización, etc.

Figura 23: Mapa de identificación de áreas afectadas por quema de crudo a partir de clasificación supervisada de máxima verosimilitud.

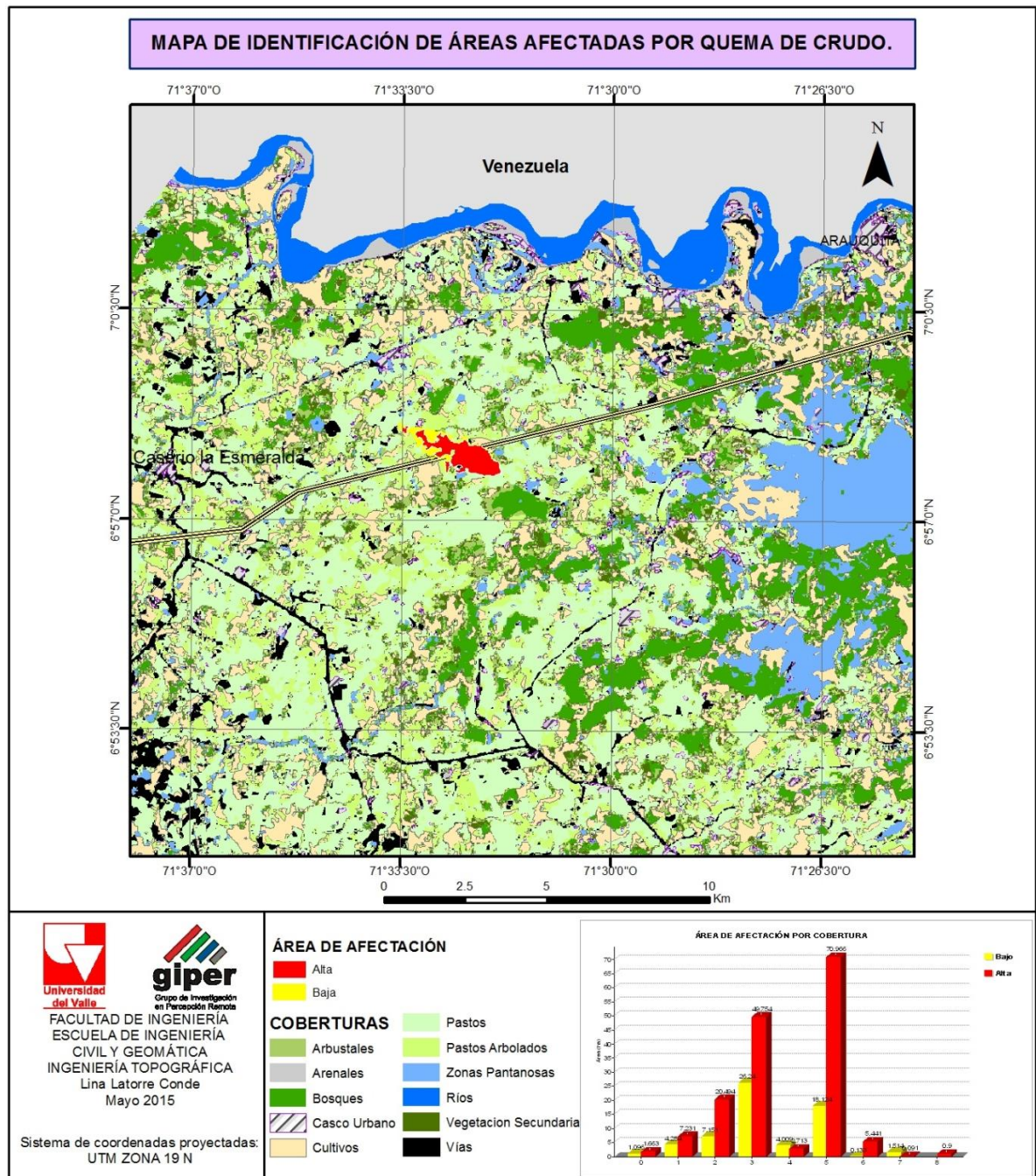


Figura 24. Mapa de identificación de áreas afectadas por quema de crudo a partir de clasificación no supervisada.

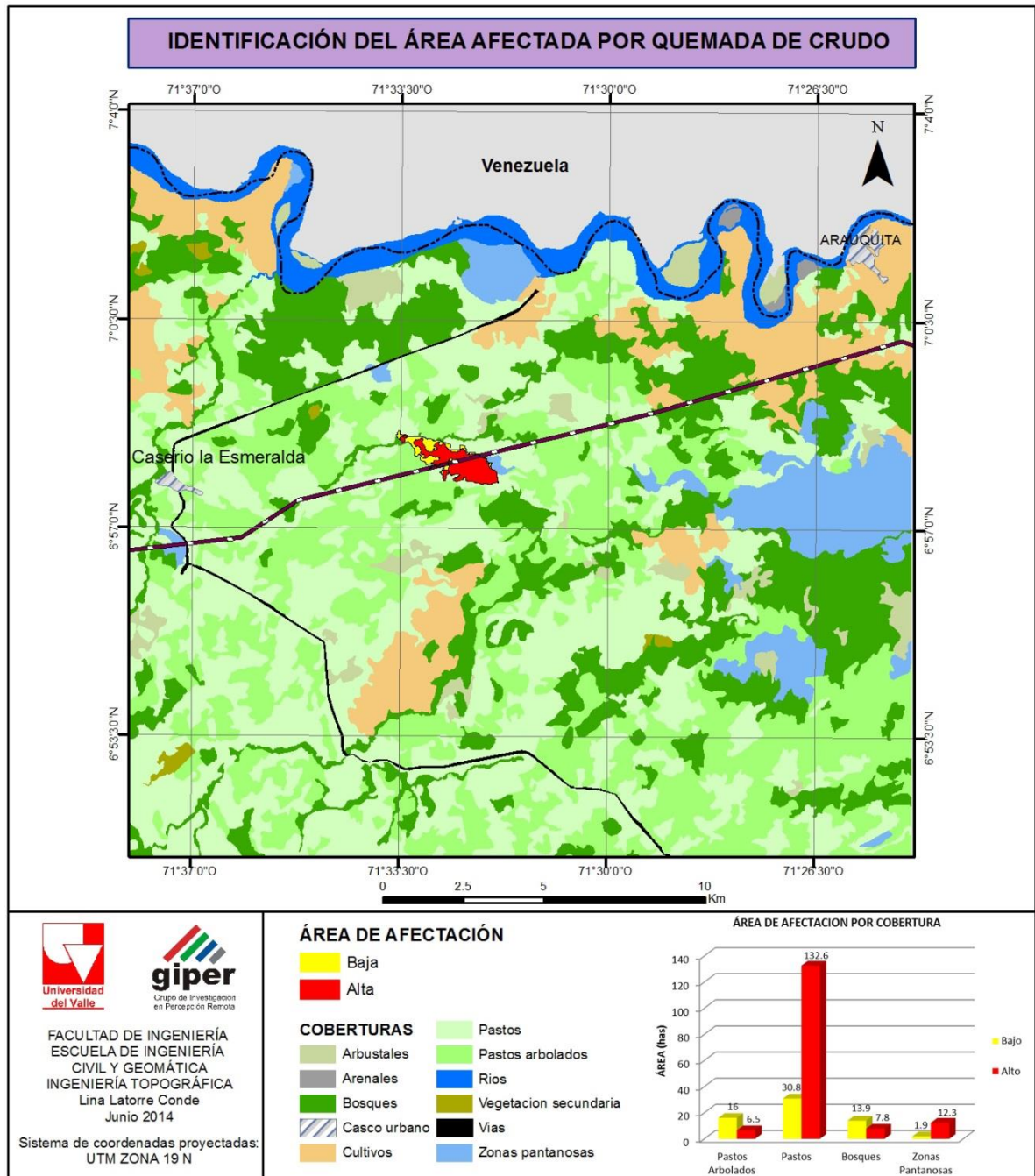


Tabla 9: Variación del área de coberturas para ambas fechas, clasificación no supervisada.

	Pre-incendio LT96	Post-incendio LT97
COBERTURAS	Área (ha)	Área (ha)
Arbustales	1909,246866	1909,246866
Arenales	242,096500	242,0965005
Bosques	11810,51194	18,6382318
Casco Urbano	68,53589523	68,53589523
Cultivos	2819,820426	2819,820426
Pastos	18997,77453	70,5113934
Pastos Arbolados	11383,92911	18,0438018
Ríos	88,08127588	88,08127588
Vegetación Secundaria	315,959614	315,959614
Vías	118,8472762	118,8472762
Zonas Pantanosas	1114,679015	114,608124
TOTAL	48869,48246	221,801551

Tabla 10: Variación del área de coberturas para ambas fechas, clasificación supervisada.

	Pre-incendio LT96	Post-incendio LT97
COBERTURAS	Área (ha)	Área (ha)
Arbustales	1738,0608	1726,5462
Arenales	435,3155	435,3155
Bosques	4694,7167	4693,1113
Casco Urbano	829,3230	828,4230
Cultivos	10342,5438	10314,8996
Pastos	13673,7742	13584,6850
Pastos Arbolados	7085,6992	7009,7052
Ríos	1830,7853	1830,7853
Vegetación Secundaria	1740,5572	1733,8354
Vías	2302,2182	2299,4601
Zonas Pantanosas	3857,1719	3851,5983
TOTAL	48530,1658	46042,2641

En la Tabla 11, se relaciona la conversión de valores en hectáreas a porcentajes de las coberturas afectadas en áreas totales (100%) en ambas clasificaciones para cada uno de los niveles de severidad, alto y bajo, que cubren la superficie total del accidente, correspondiente a 221,8015 ha.

Tabla 11: Área total de afectación.

	Clasificación no supervisada		Clasificación supervisada	
	Bajo (%)	Alto (%)	Bajo (%)	Alto (%)
COBERTURAS				
Arbustales	-	-	428,3	723,1
Bosques	1392,4	783,0	151,3	9,1
Casco Urbano	-	-	-	90,0
Cultivos	-	-	715,0	2049,4
Pastos	3076,7	13259,9	1812,3	7096,6
Pastos Arbolados	1595,1	653,3	2623,9	4975,4
Vegetación Secundaria	-	-	400,9	2713,0
Vías	-	-	109,6	1662,6
Zonas Pantanosas	190,1	1229,1	13,2	5440,8
Total (%)	100	100	100	100

6.2.4 Validación

Para cuantificar y comparar los resultados obtenidos en las clasificaciones se procedió a realizar la validación con la matriz de confusión y el coeficiente Kappa, acorde con los planteamientos de (SANTOS, 2007; LI et al., 2009; DOU et al., 2007); con la información del área definida de afectación de las coberturas en formato raster, se aplicaron las ecuaciones indicadas en el marco teórico.

Se realizó la combinación de los raster (Cobertura de la tierra IGAC 2000 y la clasificada no supervisada), con el propósito de determinar la correspondencia existente. A partir de la base de datos obtenida, se generó la matriz de confusión con los pixeles resultantes del cruce, como se observa en la Tabla 11.

Las clases de la matriz de confusión corresponden a las clases que fueron afectadas por el accidente y clasificadas por el método no supervisado. Por lo tanto la dimensión de la matriz de confusión es de 4 x 4 como se ilustra en la Tabla 11.

En general las categorías se encuentran bien discriminadas y se llegan a diferenciar satisfactoriamente a nivel de cobertura.

En el caso de los valores que no están bien clasificados se debe a que si bien se aplicó el filtrado del valor mínimo del pixel establecido en la clasificación no supervisada (tamaño representativo a clasificar) se encuentran desviados de este rango, ocasionando la confusión de clases.

El otro caso son aquellos que han presentado variaciones debido a que el sector en que se desarrolla el estudio es un ecosistema bastante dinámico y el espacio temporal de la cartografía "Coberturas de la tierra- IGAC 2002.

Tabla 12: Matriz de confusión de la clasificación no supervisada de las coberturas afectadas.

		VERDAD TERRENO				
CLASIFICACIÓN	Clases	Pastos	Bosque	Zona pantanosas	Vegetación secundaria	Total Terreno
	Pastos	31727	1403	7766	472	41368
	Bosque	3161	1694	0	0	4855
	Zona pantanosas	349	0	2812	0	3161
	Pastos Arbolados	0	0	0	0	0
	Total usuario	35237	3097	10578	472	

Con la matriz de confusión se obtuvo la exactitud del productor y la exactitud del usuario de las coberturas afectadas identificadas Tabla 14, estos datos son importantes pues a partir de ellos se obtienen el error de omisión y de comisión, indicados en la Tabla 13. Esta matriz además muestra en su diagonal las categorías clasificadas correctamente y permite calcular el coeficiente kappa por medio de la Ecuación (10) y determinar el porcentaje de exactitud global (EG).

Los errores de omisión han sido mayores a los de comisión como se observa en la Tabla 12, sin embargo la mayoría de píxeles clasificados incorrectamente obedecen mayormente a las variaciones que presenta este ecosistema dinámico, según sus aspectos biofísicos. O bien a la confusión entre algunas clases con valores espectrales semejantes, que quizás se encuentran desviados del rango establecido en el filtrado (valor mínimo del píxel) pero que deben ser agrupadas.

Concluyendo que la clasificación no supervisada ISODATA de la escena pre-incendio fue posible determinar el porcentaje de las hectáreas afectadas para cada clase y la discriminación del perímetro de afectación con unos resultados suficientemente fiables según el proceso de validación final para la exactitud global del producto cartográfico es de 73,40% y una categorización de 0,3 en el coeficiente Kappa, en consecuencia de que la cartografía de validación con la que se trabajó era de una época diferente a la de las escenas, factor determinante debido a la dinámica de este ecosistema, notándose en que la mayor diferencia se presenta en los valores de exactitud en las coberturas bosque y zonas pantanosas, mientras que los pastos arbolados la diferencia es mínima en ambos errores.

Tabla 13: Error de omisión y comisión para las coberturas afectadas clasificadas

Coberturas	Error de omisión (%)	Error de comisión (%)
Pastos	23,3	9,96
Bosque	65,1	9,96
Zona pantanosas	11,0	45,30
Pastos Arbolados	100	73,42

En la Tabla 14 se observan las variaciones que existen entre los valores por cobertura obtenidos a partir de la matriz de confusión y los clasificados por el usuario, con el objetivo de saber si las coberturas han sido clasificadas correctamente, sin olvidar las condiciones del sector expuestas al iniciar el numeral de validación.

De los resultados de exactitud logrados por el productor, se destaca, la clase pastos y zonas pantanosas, clasificadas con gran acierto demostrado diferencias en la clase bosques de 34%, mientras que la clase vegetación secundaria no tiene representación en el área de estudio post-incendio por la dinámica del ecosistema y la época de la clasificación referencia o enmascaramiento en otra clase.

Tabla 14: Exactitud de producto y usuario según la matriz de confusión de clasificación no supervisada.

Coberturas	Exactitud del productor (EP)	Exactitud del usuario (EU)
Pastos	76,69	90,04
Bosque	34,89	90,04
Zona pantanosas	88,96	54,70
Vegetación secundaria	0	26,58

Para el caso de la clasificación supervisada (imagen compuesta bandas 3,4,5 y SAVI) en primera medida se observa en el reporte de separabilidad de firmas espectrales por el método de Jefferies-Matusita para las 11 clases presentes, para las cuales existen dificultades en la separabilidad de las coberturas, especialmente en las cubiertas vegetales. Esto debido a la homogeneidad de la respuesta espectral en estas coberturas.

En el análisis realizado de la discriminación de coberturas, es evidente que se encuentran coberturas mal clasificadas, puesto que se ha asignación del mismo valor espectral a: vías y casco urbano con vegetación.

A partir de la construcción de la matriz de confusión relacionada en la Tabla 15, se obtuvo los resultados de exactitud del usuario y productor. En donde se observa la gran variabilidad en los porcentajes en ambas exactitudes, salvo la clase ríos, cultivos y bosques.

Tabla 15. Matriz de confusión de la clasificación supervisada.

DATOS CLASIFICADOS	DATOS DE REFERENCIA									
	Coberturas	Arbustales	Arenales	Bosques	Casco urbano	Cultivo	Pastos	Pastos arbolados	Río	Vegetación secundaria
	Arbustales	651	0	54	2	1645	50	1659	0	114
	Arenales	13	596	0	110	37	86	4	14	1
	Bosques	61	0	3602	0	714	7	509	0	19
	Casco urbano	6	47	0	633	199	161	47	0	1
	Cultivo	920	13	556	9	6696	748	6220	0	242
	Pastos	242	0	3	4	1042	6000	1147	0	36
	Pastos arbolados	266	0	14	2	1719	620	2641	0	25
	Río	0	7	0	0	0	0	0	1606	0
	Vegetación secundaria	574	0	264	0	1599	15	864	0	269
	Vías	99	47	10	210	535	1326	459	0	8
	Zonas pantanosas	105	20	767	11	428	65	259	0	30
	Total clasificador	2937	730	5270	981	14604	9078	13809	1620	745

Continuación Tabla 15

DATOS CLASIFICADOS	DATOS DE REFERENCIA			
	Coberturas	Vías	Zonas pantanosas	Total referencia
	Arbustales	2	166	4343
	Arenales	6	212	1079
	Bosques	0	14	4926
	Casco urbano	121	106	1321
	Cultivo	42	449	15895
	Pastos	53	323	8850
	Pastos arbolados	4	76	5367
	Río	0	0	1613
	Vegetación secundaria	1	147	3733
	Vías	828	671	4183
	Zonas pantanosas	156	11112	12953
	Total clasificador	1213	13276	64263

En la Tabla 16 Exactitud de producto y usuario según la matriz de confusión, se describe la baja concordancia de resultados entre ambas exactitudes en resultado obtenido bajo la aplicación de la clasificación supervisada para coberturas definidas en la zona.

Tabla 16. Exactitud de producto y usuario según la matriz de confusión de clasificación supervisada.

Coberturas	Exactitud del productor (EP)	Exactitud del usuario (EU)
Arbustales	22,17	14,99
Arenales	81,64	55,24
Bosques	68,35	73,12
Casco urbano	64,53	47,92
Cultivo	45,85	42,13
Pastos	66,09	67,80
Pastos arbolados	19,13	49,21
Río	99,14	99,55
Vegetación secundaria	36,11	7,21
Vías	68,26	19,79
Zonas pantanosas	83,70	85,79

Los errores de comisión han sido mayores a los de omisión como se observa en la Tabla 17, sin embargo la mayoría de píxeles clasificados incorrectamente obedecen al comportamiento homogéneo de la respuesta espectral entre las coberturas principalmente de vías, pastos arbolados, casco urbano y arenales que algoritmo asigna a estas.

Concluyendo que la clasificación supervisada de máxima verosimilitud aplica en este sector no es confiable al según los resultados del proceso de validación final para la exactitud global del producto cartográfico de 26,95% y una categorización de 0,0135 en el rango leve definido para el coeficiente Kappa, en consecuencia al esfuerzo realizado por el algoritmo por definir las homogeneidad en la respuesta espectral de las clases.

Tabla 17. Error de omisión y comisión para la clasificación supervisada de coberturas.

Coberturas	Error de omisión (%)	Error de comisión (%)
Arbustales	77,83	85,01
Arenales	18,36	44,76
Bosques	31,65	26,88
Casco urbano	35,47	52,08
Cultivo	54,22	57,87
Pastos	33,91	32,20
Pastos arbolados	80,87	50,79
Río	0,86	0,43
Vegetación secundaria	63,89	92,79
Vías	31,74	80,44
Zonas pantanosas	16,30	14,21

7. DISCUSIÓN

La metodología propuesta se ha aplicado a la zona afectada por el incendio ocurrido el 14 de septiembre de 1997 tras producirse el incendio. Con la necesidad de conocer la extensión del área afectada y coberturas implicadas. Estos resultados se pueden utilizar para posteriores análisis de regeneración, con el fin de realizar la gestión forestal de la forma más adecuada.

Se puede observar en el análisis de cambios, que la aplicación de índice NDVI la reflexión diferencial de las bandas roja e infrarroja (IR) permitió discriminar entre las coberturas vegetales con alta actividad fotosintética y alteradas -degradadas; por lo tanto las coberturas alteradas son aquellas que oscilan en el rango de valores cercanos a cero, aunque en este mismo rango ocurre un enmascaramiento de clases entre: cuerpos de agua, nubes y el área del incendio de la misma manera que lo demuestra el estudio base del documento (Padilla, 2005); debido que la superficie absorbe de igual manera la luz del visible y la radiación infrarroja (López, 2012).

Al aplicar la metodología planteada para observar las variaciones de los índices espectrales sobre áreas quemadas, al igual que Opazo y Rodríguez (2007); se obtiene resultados satisfactorios utilizando el índice SAVI, que ajusta los valores de reflectancia en las bandas tres y cuatro de la zona (brillo y color) por medio del factor de ajuste L sujeto a la densidad de la vegetación a evaluar (Huete, 1988), que proporciona la mejor estimación de la cubierta vegetal (Purevdorj et., al. 1998) y permite la aproximación del área afectada evitando confusión con superficies de comportamiento similar, y facilitando su discriminación y reduce los errores de comisión,

La aplicación de los índices de vegetación y el análisis con las diferencias entre fechas es de vital importancia para el análisis de variación multitemporal en las cubiertas y el comportamiento del fenómeno a lo largo del área de influencia (límite municipal superior Municipio de Arauquita) del oleoducto y la focalización del sector afectado. Estas diferencias entre imágenes pueden lograr lo que el índice en la fecha del accidente no alcanza a mostrar.

Para el estudio realizado por (Padilla, 2005) el índice de vegetación óptimo, capaz de definir los rasgos homogenizados de cada cobertura y mostrar las variaciones en el periodo de tiempo definido fue el GEMI, a diferencia de este estudio donde no es idóneo para la zona de estudio ya que se ve afectado por sus características.

Puntualizado el sector afectado se aplicaron los dos índices para delimitación del área quemada que se observa en el análisis espectral Figura 20, que los resultados obtenidos para el índice NBR presentan problemas como lo demuestra (Silva et al., 2014), el índice aun que hace una buena discriminación de las coberturas con valores altos de reflectancia, no arroja resultados óptimos puesto que enmascara el área quemada con cuerpos de agua, suelos saturados en humedad y vegetación hidrófita, de tal manera que no determina claramente el área de afectada.

Obteniéndose en el proceso de clasificación y análisis espectral del NBR solo en 3 tres clases, clase 1: vegetación alto contenido de agua y área afectada, área correspondiente 2866 (ha), clase 2: vegetación (pasto, arbustales y bosques) área correspondiente 2866 (ha) y clase 3: casco urbano, vías y cubiertas de agua área correspondiente 2406 (ha).

En el proceso final de validación por medio de matriz de confusión e índice kappa y utilizando la metodología descrita por (Rodríguez, 2011), se obtuvo resultados suficientemente fiables, con exactitud global del producto cartográfico de 73,40% y una categorización de 0,3 en el coeficiente Kappa para la clasificación no supervisada.

Mientras que los resultados obtenidos empleando la clasificación supervisada no se logra valores idóneos desde la separabilidad de firmas espectrales tanto de cubiertas vegetales como en los territorios artificiales; bajo esta premisa la cantidad de píxeles clasificados y analizados en la matriz de confusión demostraran que hay coberturas mal clasificadas puesto que se le asignó el mismo valor de pixel a dos cubiertas diferenciables por el interprete como por ejemplo lo son: vías y casco urbano con vegetación.

En consecuencia la clasificación supervisada de máxima verosimilitud no arroja resultados en el proceso de validación en la exactitud global del producto cartográfico de 26,95% y una categorización de 0,0135 en el rango leve definido para el coeficiente Kappa, en consecuencia al esfuerzo realizado por el algoritmo por definir las homogeneidad en la respuesta espectral de las clases

.

8. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos partir de las bandas de los valores de reflectancia de los canales rojo e infrarrojo para el análisis del cambio de las coberturas presentes en la zona a partir de índices de vegetación aplicado a las escenas, se definió que el índice de vegetación más óptimo fue el SAVI ya que el factor de ajuste de la línea de vegetación al suelo que utiliza este índice a diferencia de los demás aplicados, muestra los mejores valores de discriminación en el cambio en coberturas vegetales y las áreas con afectación y las no afectadas; notándose en la distribución del histograma pre, post y diferencia de imágenes del proyecto.

El índice NBR presenta problemas de enmascaramiento de firmas espectrales entre el vegetación alto contenido de agua y área afectada 2866 (ha), vegetación, pasto, arbustales y bosques 1779 (has) y casco urbano, vías y cubiertas de agua 2406 (ha).

Concluyendo así el índice con el que se llega al objetivo por su óptima definición del perímetro afectado es el BAI, debido a que este es capaz de discriminar los valores altos de los cuerpos de agua y también el área afectada. Como resultado se extrae que el sector de interés ocupa un área de 48869,4824 (ha) y el perímetro definido del accidente es de 221.8015 (has) con un total de cambio en el sector de 48647,6809 (ha) extrayendo los cuerpos de agua fue el índice de mejor comportamiento no logró la discriminación total de estas dos cubiertas como si se observa en la literatura base (Chuvieco et al., 2002).

Concluyendo que la clasificación (ISODATA) realizada con el eficaz algoritmo del software ENVI 5.0 de la escena post-incendio fue posible determinar que la extensión del área total afectada fue de 221,8015 ha y que se conserva 48647,6809 ha versus el área total de la ventana de interés, 48869,4824 ha.

Se define que las cubiertas afectadas en niveles de severidad bajo y alto: pastos arbolados (bajo 16% - alto 6,5%), pastos (bajo 75,107% - alto 87,577%), bosque (bajo 21,972% - alto 4,687%) y zonas pantanosas (bajo 2,921% - alto 7,736%).

Se obtienen los valores de la validación para las clasificaciones supervisada y no supervisada, en donde se muestra matricialmente las falencias en los métodos en la discriminación y definición de las coberturas presentes.

En el caso de la clasificación supervisada la alta homogeneidad en los valores espectrales de cubiertas vegetales con territorios artificiales, provocó una variabilidad mayormente en los errores de omisión y en consecuencia una baja exactitud obtenida por el producto cartográfico de 26,95% y categorización 0,0135 ubicada en el rango leve para el coeficiente kappa.

Y finalmente tras el análisis entre clasificaciones se obtienen resultados suficientemente fiables para la clasificación no supervisada según el proceso de validación final para la exactitud global del producto cartográfico de 73,04% y una categorización de 0,3 en el coeficiente Kappa, en consecuencia de que la cartografía de validación con la que se trabajó era de una época diferente a la de las escenas, factor determinante debido a la dinámica de este ecosistema, se observa que la mayor diferencia se presenta en los valores de exactitud en las coberturas bosque y zonas pantanosas.

En el producto cartográfico se encuentra el registro de los daños ecológicos ocasionados por el incendio ocasionado por derrame de crudo; abriendo la posibilidad de generar planes de contingencia que permitan la recuperación de la vegetación después del incendio, optimizando y ahorrando recursos.

9. RECOMENDACIONES

Para obtener buenos resultados en la discriminación de área afectada es preciso contar con información de las coberturas presentes en la zona, según sea el tipo de ecosistema y época; debido a que el análisis deberá ir sujeto las características biofísica (humedad, viento, temperatura etc.), las cuales influenciarán el comportamiento del accidente ya sea por absorción, esparcimiento del material inflamable o propagación y severidad de la quema.

Es preciso contar con la información de la ocurrencia de incendios registrados de manera antrópica y natural en la zona, para el análisis de ambos sobre diferentes coberturas presentes en la zona en diferentes épocas, puesto que es necesario a partir de los datos históricos y de campo darle una total veracidad a las hipótesis planteadas al inicio del proyecto. Por ejemplo para este caso aún que se utilizó la información de las consecuencias de derrames de crudo (explosión e incendios), total de crudo derramado sobre recursos afectados no se contó con las características de incendios para esta zona por derrames de crudo; por lo que se contrasta con la especialización de incendios naturales (zonas quemadas 2001) sobre las unidades del paisaje para la región de la Orinoquia y de esta manera notar que no hay incendios naturales en la zona de influencia del trazado del oleoducto, el cual se ha justificado por que el municipio de Arauquita tiene un clima tropical lluvioso y demuestra efectivamente que los incendios que se presentan en la zona son generados de manera antrópica, especialmente a causa de la actividad petrolera del sector.

Se debe utilizar una fuente con las características idóneas, es decir cuando se trabaja con ecosistemas que son dinámicos es necesario contar con la cartografía de esa misma época del año para que de esta manera al realizar el proceso de validación la exactitud en el producto cartográfico sea de una excelente calidad, ya que al no ser así existirán grandes diferencias de exactitud entre las coberturas.

Es recomendable la aplicación y análisis de diferentes métodos de clasificación, esto en cuanto a los resultados que cada una puede aportar según las características espectrales y cualitativas idóneas para la clasificación correcta y efectiva de las cubiertas presentes en el área de trabajo definida.

En las futuras investigaciones sería importante realizar el análisis de afectación en los diferentes tipos de ecosistemas que se encuentran adyacentes al área de influencia del trazado del oleoducto para contar con las variaciones en la metodología según la zona y de esta manera se pueda realizar el seguimiento del impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAURREA, M. (2013). Comparación de Índices de Vegetación en Zona Semiárida de Navarra. Dirigida por GARCIA, R. Tesis Pregrado Inédita. Universidad Pública de Navarra, España, Facultad de Ingeniería, Pág. 1-31.
- AGUILAR, L. Contaminación Ambiental [en línea]. [Consultado 06 de Junio de 2014] Disponible en web: <http://contaminacion-ambiente.blogspot.com/2006/10/que-es-la-contaminacion-ambiental.html>
- ANAYA, J Y CHUVIECO, E. (2010). Validación para Colombia de la Estimación de Área Quemada del producto L3JRC en el Periodo 2001- 2007. actual Biol, Vol. 32, No. 92, Pág. 29-40.
- ANAYA, J. A. (2009). Estimación mensual de emisiones por biomasa quemada para Colombia basado en imágenes de satélite (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. España). Pág 1-155.
- ARONOFF, S. (1975). The Minimum Accuracy Value as an Index of Clasification Accuracy. Photogrammetric Eng and Remote Sensing. Pág. 99-111.
- ATLAS, R., & BARTHA, R. (2002). Ecología microbiana y microbiología ambiental. Ed. Addison Wesley. Madrid. Pág 561.
- BASTARRIKA, A., Chuvieco, E. y Martín, M.P. (2011): "Mapping burned area from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors", Remote Sensing of Environment. Vol. 115, Pág1003-1012.
- BLAS, M, GONZÁLEZ, A Y GURRÍA, J. (s.f). CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS CON SPOT 5. Madrid: España. Laboratorio de Teledetección CIFOR-INIA. Pág. 623-636. Web. Recuperado 10 de Mayo de 2014 en http://age-tig.es/docs/XII_2/045%20-%20Blas%20Morato%20et%20al.pdf
- BLASCHKE, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.65, No.1, Pág.2-16.
- BRIZUELA, A. B., AGUIRRE, C. A., & VELASCO, I. (2007). Aplicación de Métodos de Corrección Atmosférica de Datos. Teledetección, Pág. 207-214.
- CASTRO, G. (2007, Junio). Diseño monitoreo frente derrames de hidrocarburos. Chile: Quillota. Servicio Agrícola y Ganadero. .Pdf, Pág. 19-21. Web. Recuperado el 10 Mayo de 2014 en http://www.sag.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_ASESORIA_SAG_HCS2.pdf

- CERDA, J. & VILLARROEL, L. 2008. Evaluación de la Concordancia Inter-observador en Investigación Pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, Vol.79, No.1, Pág.54-58.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., & HELDER, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, Vol. 113 No.5, Pág. 893-903.
- CHÁVEZ, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 62, No.9, Pág. 1025-1035.
- CHINEA, J. (2002). Teledetección del bosque. *Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales*. Ediciones Libro Universitario Regional, Costa Rica, Pág. 625-646.
- CHUVIECO, E. (1996). *Fundamentos de teledetección*. Madrid: Ediciones Rialp.
- CHUVIECO, E. (2002). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- CHUVIECO, E., & PALACIOS, A. (2002). Assessment of Different Spectral Indices in the Red-near-infrared Spectral Domain for Burned Land Discrimination. *International Journal of Remote Sensing*. 23: 5103-5110.
- CHUVIECO, E., OPAZO, S., SIONE, W., DEL VALLE, H., ANAYA, J., DI BELLA, C., CRUZ, I., MANZO, L., LÓPEZ, G., MARI, N., GANZÁLEZ, F., MORELLI, F., SETZER, A., CSISZAR, I., KARPANDEGUI, J., BASTARRIKA, A. & LIBONATI, R. (2007). Global Burned Land Estimation in Latin America using Modis Composite Data. *Ecological Applications*.
- CHUVIECO, E, MARTIN, M, & VENTURA, G. (2002). Evaluación de imágenes NOAAAVHRR y TERRA-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas. In X Simposio Internacional de la Sociedad de Expertos Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER).
- COCKE, A. E., Fule, P. Z. & CROUSE, J. E. (2005): Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 189-198.
- COMISIÓN NACIONAL ASESORA PARA LA PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES. (2002, 12 de Diciembre). Plan nacional de prevención: Control de incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas. Pág. 51-54. Recuperado el 2 de Mayo de 2014 en https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Los-Incendios-forestales/554_plan_preencion_incendios.pdf
- COPPIN, P., & BAUER, M. (1994). Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Vol. 32, No. 4, Pág. 918-927.

- CUSARÍA, A. (1997). Petróleo, seguridad ambiental y exploración petrolera marina en Colombia. ICON OS, Vol. 21, Pág.11-17.
- DIRECCIÓN GENERAL DE GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE S.A. (1984, 1 de Marzo). Aspectos Técnicos de las Imágenes Landsat. Pág. 10-15. Recuperado el 2 de Mayo de 2014 en http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_de_imagenes_landsat.pdf
- DOU, W.; REN, Y.; WU, Q.; RUAN, S.; CHEN, Y.; BLOYET, D.; CONSTANS, J. 2007. Fuzzy Kappa for the Agreement Measure of Fuzzy Classifications. *Neurocomputing*, Vol.70, No.4-6, Pág..726-734.
- ECOPETROL. (Marzo 2002). Informe de Coyuntura No 2. Terrorismo y Petróleo en Colombia. S. F de Bogotá, mimeo, Pág. 17.
- EL TIEMPO (1997, 16 de septiembre). ELN Dinamitó Oleoducto. Pág. 1. Recuperado el 14 de octubre de 2012 en <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-605324>
- FATIMA, B., FLAVIO, A., OLIVEIRA, C., BENEDICT, O & WILLIAM, T. (2003). Bioremediation of Soli Contaminates by Diesel oil. *Brazilian Journal Microbiology*. Vol. 3, Pág. 65-68.
- GILABERT, M. A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., & GARCÍA-HARO, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, Vol. 8, Pág. 35-45.
- GUTIÉRREZ, C. P., & NIETO, Á. L. M. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones. Carlos Pérez y Ángel Muñoz. España: Sin Editorial. Recuperado el 24 de Abril de 2013 en https://books.google.com.co/books?id=SfrGxbO1DT0C&pg=PP4&lpg=PP4&dq=Teledetecci%C3%B3n:nociones+y+aplicaciones.+Carlos+Perez&source=bl&ots=pDgbXC1mGV&sig=zn3z26cbUwdWTI_h9L8w484YUTU&hl=es&sa=X&ei=bxu6VNemC4qYNoHJgLG&ved=0CCMQ6AEwAQ#v=onepage&q=Teledetecci%C3%B3n%3A%20nociones%20y%20aplicaciones.%20Carlos%20Perez&f=false
- HAY, G.J.; CASTILLA, G.; WULDER, M.A.; RUIZ, R.J. 2005. An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.7, No.4, Pág.339-359.
- HUETE, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, Vol.25, No. 3, Pág.295-309.
- IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1: 100.000.
- INSTITUTO MEXICANO DE TRANSPORTE. (2002). La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes: Aplicación en la infraestructura del transporte. Sanfandila, México: Publicación Técnica. No. 195.

- JHA, M.N., Levy, J. & Gao, Y., (2008). Advances in Remote Sensing for Oil Spill Disaster Management: State-of-the-Art Sensors Technology for Oil Spill Surveillance. *Sensors*, Vol. 8, No. 1, Pág.236-255.
- KEY,CH & BENSON, NC 2004. Landscape Assessment: Remote sensing of Severity, theNormalized Burn Ratio. In: 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'.(D.C. Lutes; R.E. Keane; J.F. Caratti; C.H. Key; N.C. Benson; L.J. Gangi) General TechReport RMRS-GTR-XXX, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, in press.
- KEY, C., & BENSON, N. (1999). The normalized burned ratio, a Landsat TM radiometrics index of burn severity incorporating multitemporal differencing. *Frames Resource Cataloging System (Rcs)*, Pág. 39
- LEVIN, N. (1999). Fundamentals of remote Sensing. Hydrographic Data Management course, IMO - International Maritime Academy, Trieste, Italia.
- LEVINE, J. S. (1996). Biomass Burning and Global Change: Remote sensing, modeling and inventory development, and biomass burning in Africa (Vol. 1). MIT Press.
- LI, M.; WU., Y.; ZHANG, Q. 2009. SAR image segmentation based on mixture context and wavelet hidden - class - label Markov random field. *Computers and Mathematics with Applications*. Vol.57, No.6, Pág.961-969.
- LOBADA, T., O'NEALY, K., y CSISZAR, I. (2007). Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 109, N°4, Pág. 429-442.
- LÓPEZ P. (2012). Tendencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para una zona del centro de México. Dirigida por Dr, Guevara A. Tesis pregrado Inédita. Universidad autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales.
- LUCAS, R.; ROWLANDS, A.; BROWN, A.; KEYWORTH, S.; BUNTING, P. 2007. Rule-based classification of multitemporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.62, No.3, Pág.165-185.
- MARTÍN, M.P y CHUVIECO, E. (2001). Propuesta de un Nuevo Índice para Cartografía de Áreas Quemadas: Aplicación a Imágenes NOAA-AVHRR y Landsat-TM. *Revista de Teledetección*, N° 16, Pág. 57-64. .
- MARTÍN, M.P y CHUVIECO, E. (1998). Cartografía de grandes incendios forestales en la península ibérica a partir de imágenes NOAAAVHRR. *Serie Geográfica*. No. 7, Pág. 109-128.
- MENESES, T. (2011). El Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación como Indicador de la Degradación del Bosque. *Unasylva* No. 238, Vol. 62, Pág. 39-46.
- MIRANDA, D & RESTREPO, R. (2005). Los Derrame de Petróleo en Ecosistemas Tropicales - Impactos, Consecuencias Y Prevención. La Experiencia de Colombia.

ECOPETROL Instituto Colombiano de Petróleo. Colombia. International Oil Spill Conference Proceedings: Vol. 2005, No. 1, Pág. 571-575.

NAVARRO, R., HA., HAYAS, A., GARCÍA, A., HERNÁNDEZ, R., DUHSLDE, P., & GONZÁLEZ L. (2008). Caracterización de la Situación posincendio en el Área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional de Torres del Paine (Chile) a Partir de Imágenes de Multiespectrales. Revista chilena de Historia Natural. Vol.81, No.1, Pág 95-110.

ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONA., INTERNATIONAL PETROLEUM INDUSTRY ENVIRONMENTAL CONSERVATION ASSOCIATION., & ASOCIACIÓN REGIONAL DE EMPRESAS DE PETROLEO Y GAS NATURAL EN LATINOAMERICA Y EL CARIBE. (1996). Desarrollo de Mapas de Sensibilidad para la Respuesta a Derrames de Hidrocarburos. Serie de informes, Vol. 1.

OPAZO, S., & RODRÍGUEZ, F. (2007). Variación Espacial de los Índices Espectrales sobre Áreas Quemadas en Suramérica. Universidad de la Rioja, Cuadernos de Investigación Geográfica. No. 33. Pág. 39-57.

ORIGEL-GUITIÉRREZ, G., & TORRES-RODRÍGUEZ, V. (2002). Mapa de amenazas de contaminación por derrames de hidrocarburos en una región tropical de México. Cuernavaca, Mar, México: Unidad de Geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Vol. 1 Pág. 475.

PUREVDORJ, T. S., TATEISHI, R., ISHIYAMA, T., & HONDA, Y. (1998). Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, Vol 19, No. 18, Pág3519-3535.

PADILLA, O. (2005). Cartografía de Áreas Quemadas a Escala Local. Tesis Doctorado Inédita. Universidad de Alcalá de Henares, Madrid: España, Programa de Doctorado de Cartografía, SIG y Teledetección, Faculta de Ingeniería. Pág 1-21.

PARISIEN, M., VERNON, S., YONGHE, J., BOSCH, E., y STACKS, B. (2006). Spatial patterns of forest fires in Canada, 1980-1999. International journal of wildland fire. Vol. 15, No.3, Pág. 361-374.

PEREIRA, M. C., y SETZER, A. W. (1993). Characteristics of fire scars in Landsat TM images of Amazonia. International Journal of Remote. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, No 11, Pág. 2061-2078.

PEREIRA, J. M. (1999). A Comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation index for burned surface detection and mapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 37. No. 1. Pág. 217-226.

PEREIRA, J. M., SÁ, A. C., SOUSA, A. M., SILVA, J. M., SANTOS, T. N., & CARREIRAS, J. M. (1999). Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In Remote sensing of large wildfires. Springer Berlin Heidelberg. Pág 123-138.

PINTY, B., & VESTRAETE, M. M. (1992). GEMI. A non-linear Index to monitor global vegetation from satellites. Vegetation, Pág.15-20.

- REJAS J, (2008). Tratamiento Digital Previo de las Imágenes Pág 1-34. Recuperado el 02 de Mayo de 2014 en http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45518/componente45516.pdf
- REUTER, F (2009). Principios de teledetección. Facultad de Ciencias Forestales. Argentina: Santiago de Estero. Serie Didáctica No.33. Pág. 1-74.
- RICHARDS, J. A. (1995) Remote Sensing Digital Image Processing. An Introduction. Springer-Verlag, Berlin: Germany. Selected papers from sessions at the IAHS Assembly in Foz do Iguaçu, Brazil, 2005). IAHS Publ. 318, 2007.
- ROMERO-RUIZ, M., GALINDO, G., OTERO, J., & ARMENTERAS, D. (2004). Ecosistemas de la cuenca del Orinoco Colombiano. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia Pág 189.
- RODRÍGUEZ, A (2011) Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- RUIZ-GALLARDO, J. R., CASTAÑO, S., & VALDÉS, A. (2005). Teledetección y Severidad del Fuego. Puerto de la Cruz, Tenerife: XI Congreso Nacional de Teledetección.
- SANTIS, A.y& VAUGHAN, P. (2009). Revisión de las Técnicas de Identificación Cartográfica de Áreas Quemadas. Recursos Rurais. Vol. 5, No.1, Pág. 93-100.
- SANTOS, J.C. 2007. Extração de atributos de forma e seleção de atributos usando algoritmos genéticos para classificação de regiões. Tesis de maestría. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil, Pág.1-102.
- SEVERYN, H., DEGADO, J., GODOY, A., y GARCÍA, Y. (2003). Efectos del derrame de petróleo del buque Nissos Amorgos sobre la fauna macroinvertebrada bentónica del Golfo de Venezuela. Cinco años después. Ecotrópicos Vol 36, No1, Pág. 83-90.
- SIFAKIS, N., PARONIS, D. y KERAMITSOGLOU, I. (2004). Combining AVHRR Imagery with CORINE Land Cover Data to Observe Forest Fires and to Assess Their Consequences. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 5, No.1, Pág. 263-274.
- SILVA, C, OLTHOFF, A, GAMA, L., SÁNCHEZ, E y ALCÁNTARA, A. G. (2014). Discriminación de Umbrales de Áreas Quemadas Mediante Imágenes Landsat Tm, En La Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. Kuxulkab', 15(28).
- SOFOS GRUPO DE ESTUDIOS Y TRABAJO ACADÉMICO (2013, 14 de Septiembre). Los Desafíos Ambientales que Enfrenta Nuestra Civilización Para Construir Otra Clase de Relaciones con la Naturaleza: El Punto de Vista Ambientalista Y Ecológico". Pág. 1-3. Recuperado 10 de diciembre de 2013 en <http://www.otraparte.org/actividades/sofos/doc-sofos/doc-sofos-20130914.pdf>

- STORY, M. y CONGALTON, R. 1986. Accuracy assessment: a user's perspective. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing. Pág.397-399.
- TRIGG, S., y FLASSE, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. International Journal of Remote Sensing, Vol. 22, No. 13, Pág. 2641-2647.
- VIEDMA, O., y CHUVIECO, E. (1994). Cartografía Y Evaluación De Daños Causados Por Incendios Forestales Mediante Técnicas De Teledetección. AΓΠΜ Boletín de Información Técnica, Vol.167, Pág.60-66.
- VIEDMA, O, SALAS, J y CHUVIECO, E.1993. Evaluación de daños causados por el incendio de Buriol (Valencia) con imágenes TM. En: V Reunión científica de la Asociación Española de Teledetección, las Palmas de Gran Canaria.
- WHITTO, R., BRADLEY, R., COLBERG, G., & COLÓN Y. (s.f). Comité de satélites para la observación desde el espacio. Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Pág. 21-27.
- WHITE, J., RYAN, K., KEY, C., & RUNNINGS, S. (1996). Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. Int J Wildland Fire. Vol. 6, Pág.125-136.

ANEXOS

Registro histórico 2004-2012, derrames oleoducto Caño Limón-Coveñas municipio de Arauquita, departamento de Arauca Colombia.

RADICADO INFORME INICIAL	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	VEREDA	EMPRESA	FUNCIONARIO RESPONSABLE	MES	FECHA DERRAME
36444	Arauca	Arauquita	La Ceiba	Ecopetrol	Guillermo Alberto Montes, Tel: (097) 5760260	Marzo	29/03/2009
39857-12	Arauca	Arauquita	San Rafael	Ecopetrol	Ángel Giovani Serna León Tel: 5760260, ext. 46601	Julio	16/07/2012
1065-05	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes C. Tel: 097-5760260	Enero	03/01/2005
31237-07	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes C. Tel: 097-5760260	Febrero	11/02/2007
29315-08	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes C. Tel: 097-5760260		12/03/2008

69597-08	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes C. Tel: 097-5760260	Junio	22/06/2008
29315-08	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes C. Tel: 097-5760260	Marzo	12/03/2008
69597-08	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes C. Tel: 097-5760260	Junio	22/06/2008
82502-08	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo A. Montes Tel: 097 5760422	Julio	21/07/2008
36444-09	Arauca	Arauquita		Ecopetrol	Guillermo Alberto Montes (097) 5760260	Marzo	29/03/2009

Continuación de Tabla

Abscisa	PRODUCTO	VOLUMEN (Barriles)	ORIGEN	CAUSA	AFECTACIÓN A RECURSOS NATURALES	RECURSO AFECTADO	ACCIONES EJECUTADAS
LA ceiba, Araucita, Arauca. Oleoducto Caño Limón Coveñas PK 052+080	Crudo	900	Atentado con carga explosiva	Acción Terceros	50m de suelo y cráter de 5metros de diámetro.	No reporta	Suspensión del bombeo, sobrevuelo en helicóptero, aseguramiento del área por la fuerza pública, coordinación con la brigada para la reparación. Se informan las labores de limpieza de la zona.
PK 044+250 Caño Limón Coveñas	Crudo	Por definir	Atentado con carga explosiva	Acción Terceros	Afectación de 2500m2 de potreros con pasto.	Suelo y flora	Sobrevuelo de la zona.

Vereda La Ceiba. PK. 050+000 del oleoducto.	Crudo	850	Atentado Terrorista	Acción Terceros	Se afectaron 4000m2 de terreno para potreros. La mayor parte del crudo quedó depositado en un cráter de 3m x 3m.	Suelo, agua y flora	Inspección área del sitio del atentado. Movilización de personal y equipo para la reparación del oleoducto.
PK. 026+700 del Oleoducto, sector Las Blancas	Crudo	10610	Atentado terrorista	Acción Terceros	Afectación de un área puntual de 400 m2 de suelo (rastrojo). Se presentó un incendio de grandes proporciones.	Suelo, agua y flora	Inspección, Notificación. Desplazamiento de personal y equipo para atención de la emergencia.
PK 030+150 del oleoducto, Vereda El Troncal	Crudo	10	Por definir	Por definir	Afectación de suelo y vegetación rastrera en un área de 600 m2	Suelo, agua y flora	Notificación e inspección; Paro de bombeo; Limpieza del área afectada
Vereda Villa Rosario	Crudo	200	Atentado terrorista	Acción Terceros	Afectación de suelo, pastos y rastrojo bajo, Afectación de aire por incendio	Suelo, agua y flora	Notificación e inspección;

PK 030+150 del oleoducto, Vereda El Troncal	Crudo	Por definir	Por definir	Por definir	Afectación de suelo y vegetación rastrera en un área de 600 m2	Suelo y flora	Notificación e inspección; Paro de bombeo; Limpieza del área afectada
Vereda Villa Rosario	Crudo	200	Atentado terrorista	Acción Terceros	Afectación de suelo, pastos y rastrero bajo, Afectación de aire por incendio	Suelo, flora y aire	Notificación e inspección;
Arauquita, La esmeralda	Crudo	1500	Atentado terrorista	Acción Terceros	potreros, pastos, desplazamiento de la cabeza de la mancha sobre caño Picho aprox. A 2 km del sitio del evento.	Suelo, agua y flora	Suspensión de Bombeo; inspección aérea; informe al municipio de Arauquita; activación punto de control sobre caño picho; recorrido terrestre para ubicar la cabeza de la mancha

LA ceiba, Araucita, Arauca. Oleoducto Caño Limón Coveñas PK 052+080	Crudo	Por definir	Atentado terrorista	Acción Terceros	50m de suelo y cráter de 5metros de diámetro	Suelo y flora	suspensión del bombeo, sobrevuelo en helicóptero, aseguramiento del área por la fuerza pública, coordinación con la brigada para la reparación
---	-------	-------------	------------------------	--------------------	---	---------------	---

Continuación Tabla

PELIGROS	OLEODUCTO POLIDUCTO	CLASIFICACIÓN (Muy Alta, Alta, Media, Baja)
Incendios y/o explosiones	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Baja
Inhalación de vapores, incendio y explosión	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Por definir
	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Media
	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Alta
	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Baja
	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Media
Incendio	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Por definir

Incendios y/o explosiones	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Media
Incendio - Explosión	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Alta
Explosión e incendio	Oleoducto Caño Limón Coveñas, (CLC)	Por definir

EL TIEMPO Domingo 14 de diciembre de 2014



f t g+ y

Q BUSCAR

REGISTRAR

OPINIÓN COLOMBIA BOGOTÁ MUNDO POLÍTICA ECONOMÍA DEPORTES ENTRETENIMIENTO TECNÓSFERA

**100 años de ciencia
acompañando tu recorrido.**



ELN DINAMITÓ OLEODUCTO

Incierto era ayer el restablecimiento del bombeo de crudo por el oleoducto Caño Limón-Coveñas, dinamitado al atardecer del domingo por el Eln en área rural de Arauquita, pues hasta ayer el Ejército tomaba posiciones para garantizar la seguridad a los operarios de Ecopetrol que serán desplazados para la respectiva reparación del ducto.

El ataque se registró a las 4:00 p.m. en el kilómetro 47 de Arauquita, reportaron voceros de la estatal petrolera, al tiempo que dijeron desconocer la magnitud del crudo derramado y los daños ecológicos a las praderas, quebradas, y ríos de la región. Este atentado es el número 48 del año e iguala al total de atentados que sufrió el oleoducto en 1996.

Se afectan escuelas...

Entretanto, más de 8.195 millones de pesos para construcción de escuelas, carreteras y acueductos no se podrán emplear este año en Arauca porque las voladuras de la guerrilla al tubo mandaron al piso esos proyectos.

De los 70.778 millones de pesos que se proyectaron recibir por concepto de regalías durante 1997, se estima que únicamente se percibirán 62.583 millones de pesos, confirmó el secretario de Hacienda, Nahún Franco Mateus.

Durante los primeros cinco meses del año los giros siempre se mantuvieron por encima de los 5.500 millones mensuales, pero de ahí en adelante han caído en forma alarmante, dijo Franco.

Del último giro (julio) únicamente logramos destinar 2.198 millones de pesos para obras, porque lo restante se fue en cancelar 1.504 millones de servicio de la deuda, agregó.

Para sortear el déficit que afronta el departamento, la Secretaría de Hacienda anunció que una vez se conozca el valor de las regalías correspondientes al mes de agosto, se procederá a la elaboración de un decreto de aplazamiento, en el cual se determinarán las partidas del presupuesto que no serán ejecutadas este año.

Publicación eltiempo.com | Sección Otros | Fecha de publicación 16 de septiembre de 1997 | Autor NULLVALUE